

## کاربرد برش‌نگاری شکل موج داده‌های لرزه‌ای در یک بررسی لرزه بین‌چاهی مقیاس مهندسی

نوید امینی<sup>۱\*</sup> و عبدالرحیم جواهریان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۴/۲، پذیرش نهایی: ۹۳/۲/۳۰)

### چکیده

برش‌نگاری شکل موج داده‌های لرزه‌ای به منزله ابزاری کارا در تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای قادر است تصاویر با قدرت تفکیک زیاد از ساختارهای زمین‌شناسی عرضه کند و در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. از آنجا که در این نوع برش‌نگاری علاوه بر داده‌های زمان سیر از دامنه و شکل موج لرزه‌نگاشت‌ها نیز استفاده می‌شود در مقایسه با برش‌نگاری زمان سیر قدرت تفکیک بیشتری دارد، اما به سبب پیچیدگی‌های محاسباتی کمتر مورد استفاده عملی قرار گرفته است. در این مقاله نتایج اعمال برش‌نگاری شکل موج روی داده‌های لرزه‌ای حاصل از آزمایش بین‌چاهی عرضه می‌شود. آزمایش لرزه بین‌چاهی روشی متداول در بررسی ساختارها و بی‌هنجاری‌های زمین حد فاصل دو گمانه است که با توجه به هندسه برداشت عبوری انعطاف خوبی در پوشش یکنواخت زمین مورد بررسی فراهم می‌کند. در ادامه، کاربرد روش روی داده‌های مصنوعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها نیز داده‌های یک آزمایش بین‌چاهی مهندسی با استفاده از این روش وارون‌سازی می‌شود که طبق نتایج آن تصویری با جزئیات بیشتری از ساختار مورد بررسی حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: برش‌نگاری شکل موج، لرزه بین‌چاهی، معادله موج، حیطه بسامد

## Application of seismic waveform tomography in an engineering seismic cross-hole study

Amini, N.<sup>1</sup> and Javaherian, A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 23 Jun 2013, Accepted: 20 May 2014)

### Summary

Seismic tomography is an imaging technique which creates maps of subsurface elastic properties such as P/S wave velocity, density and attenuation, based on observed seismograms and use of sophisticated inversion algorithms. Amongst different acquisition geometries, seismic cross-hole tomography has a special position in geophysical surveys with many applications in hydrocarbons, coal and other minerals exploration and engineering purposes investigations related to constructions. Main goal of these studies is obtaining precise information about the earth structure (layers structure, impedance of layers, faults and fractures) or anomalies (objects, pipes, voids).

Traveltime tomography is a conventional approach to convert special phase of waveform traveltimes (such as P or S wave arrivals) to corresponding parameters. Low computational effort is needed to perform traveltime tomography, but the results suffer from the lack of high resolution. Seismic waveform tomography is an efficient tool for high resolution imaging of complex geological structures and has been widely used by

researchers in the field of exploration seismology. As waveform tomography exploits waveforms, in addition to traveltimes, it has superior resolution comparing to traveltime tomography but its computational complexities have limited its everyday use in real world applications.

In this study we focus on application of waveform tomography in an engineering purpose seismic cross-hole study. Our approach relies on solution of acoustic wave equation in frequency domain and minimizing residual of calculated wavefield and observed seismograms. Frequency domain approach lets simultaneous sources modeling and implementing frequency dependent absorption mechanisms. This approach leads to a large system of equations. To solve the large system of equations sparse direct solvers can be used. The mixed-grid finite-difference used to discretize continuous second order hyperbolic acoustic wave equation. Although elastic modeling is more the realistic and near to observed data, most researchers prefer to use acoustic wave equation instead of elastic one due to lower computational costs. Instead, we pre-process the observed data to increase comparability of observations and modeling. These pre-processing include suppressing phases cannot be explained by acoustic modeling such as S waves or Rayleigh waves or scaling seismograms to take into account amplitude vs. offset effects in acoustic and elastic cases. Waveform tomography is very a nonlinear problem with a very rugged cost function. To overcome this nonlinearity, we solve the problem using hierarchical approaches. We start inversion from low frequency components, where the cost function is smoother, and then proceed to higher components. Lower frequency inversion results have been used as initial velocity model for higher frequency inversion.

A synthetic example has been used to test the performance of the algorithm in the absence and presence of noise. As the results show the performance of current waveform tomography algorithm decreases in case of noisy data, which implies the importance of denoising before inversion and/or employing regularization. Another strategy which helps to control noise issue is simultaneous inversion of frequency components in different groups, as showed in real data example. Lastly a real cross-hole dataset acquired for engineering purposes has been studied. The traveltime tomography result is used as starting model for waveform tomography. The results of waveform tomography are in agreement with downhole measurements.

**Keywords:** Seismic waveform tomography, Cross-hole seismic, Wave equation, Frequency domain

## ۱ مقدمه

کاربردهای گسترده از ساخت و ساز گرفته تا بررسی جایگاه‌های مناسب برای دفن زباله‌های هسته‌ای را پوشش می‌دهد. هدف کلی از اجرای این تحقیقات به دست آوردن اطلاعات دقیق از ساختار لایه‌ای زمین (نظیر لایه‌بندی سنگ‌ها، امپدانس لایه‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌ها) و یا از طرف دیگر بررسی بی‌هنجاری‌ها (نظیر اشیاء، توده‌های سنگی، لوله‌ها، حفره‌ها و مانند آن) است.

در برش‌نگاری لرزه‌ای با اندازه‌گیری دقیق زمان سیر و یا دامنه و شکل امواج و با بهره‌گیری از روش‌های وارون‌سازی می‌توان در مورد توزیع خصوصیات سرعتی و جذب محیط مورد بررسی قضاوت کرد و تصاویر ارزشمندی را به دست داد. در ژئوفیزیک، برش‌نگاری لرزه‌ای بین‌چاهی بیشترین کاربرد تحقیقاتی را دارد. کاربردهای گسترده این روش در اکتشافات نفت و گاز، زغال‌سنگ و سایر مواد معدنی، تحقیقات مهندسی با

حل معادله موج در یک محیط ناهمگن، روش‌های مبتنی بر دامنه، رشد کندتری دارند. محدودیت‌های قدرت تفکیک روش‌های مبنی بر نظریه پرتو به‌صورت گسترده در متون مربوط به برش‌نگاری مورد بحث قرار گرفته است و نگرانی عمده استفاده از این روش‌ها محسوب می‌شود (ویلیامسون، ۱۹۹۱؛ ویلیامسون و ورتینگتون، ۱۹۹۳). نظریه پرتو فقط زمانی معتبر است که ابعاد ناهمگنی‌ها در مقایسه با طول موج غالب امواج کوچک‌تر باشد. این امر یک محدودیت برای قدرت تفکیک روش‌های مبتنی بر نظریه پرتو به وجود می‌آورد.

در راستای وارون‌سازی کامل شکل موج اولین بار لایلی (۱۹۸۳) و تاراتولا (۱۹۸۴) اصول تصویرسازی کلریات (۱۹۷۱، ۱۹۷۶) را به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی محلی شده در آوردند. در این رهیافت یک تابع عدم برازش  $C(m)$  تعریف می‌شود که اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و داده محاسبه شده مربوط به مدل  $m$  را ارزیابی می‌کند. حل مسئله وارون در واقع پیدا کردن مقدار بهینه  $m$  است به شرطی که تابع  $C(m)$  کمینه شود. روش‌های غیر خطی بهینه‌سازی را می‌توان برای یافتن  $m$  به‌صورت مرحله‌ای به کار برد. در این روش‌ها با استفاده از یک مدل اولیه  $m_0$  که به اندازه کافی به مدل واقعی نزدیک است فرایند بهینه‌سازی مرحله‌ای انجام می‌پذیرد. در رهیافت وارون‌سازی شکل موج تمامی محتوای یک لرزه‌نگاشت را در فرایند بهینه‌سازی لحاظ می‌شود. در این روش‌ها معادله موج به‌صورت کامل (مدل‌سازی مستقیم) در هر مرحله از بهینه‌سازی حل می‌شود و مدل سرعتی بهینه‌سازی شده در هر مرحله در حکم مدل اولیه مرحله بعدی استفاده می‌شود. شایان ذکر است که همه انواع امواج در فرایند بهینه‌سازی؛ شامل امواج شیرجه‌ای، بازتاب‌های فرابحرانی، و تکراری‌ها، حضور دارند. روش مدل‌سازی مستقیم مورد استفاده در این رهیافت بسته به روش‌های گسسته‌سازی ممکن است روش المان محدود،

این مقاله به موضوع برش‌نگاری شکل موج و کاربرد آن در وارون‌سازی داده‌های لرزه بین‌چاهی می‌پردازد. برش‌نگاری شکل موج در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در برش‌نگاری شکل موج، مدل سرعتی از وارون‌سازی لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده با گیرنده‌ها حاصل می‌شود. برخلاف روش‌های زمان سیر که در آنها فقط داده‌های زمان سیر وارون می‌شود، در روش حاضر دامنه و فاز داده‌های لرزه‌ای نیز در وارون‌سازی لحاظ می‌شود. اگرچه از لحاظ نظری روش‌های برش‌نگاری شکل موج بسیار جذاب و امیدبخش هستند اما به علت پیچیدگی‌های محاسباتی (یک مرتبه سنگین‌تر از مهاجرت عمقی پیش از برانبارش هستند) و ظرافت‌های عددی لازم در اجرا، کمتر جای خود را در استفاده‌های روزمره باز کرده‌اند. روش‌های برش‌نگاری شکل موج نسبت به روش‌های زمان سیر چند تفاوت عمده دارند: ۱- داده‌های ورودی در برش‌نگاری شکل موج همان لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده هستند. در مقایسه با زمان سیر، دامنه داده‌ها حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پارامترها نشان می‌دهند. ۲- در مقایسه با داده‌ها زمان سیر، حجم اطلاعات بیشتری در داده‌های شکل موج حضور دارد؛ بنابراین گستره پارامترهایی که می‌توانند داده‌ها را بازسازی کنند محدودتر می‌شوند. ۳- برخلاف روش‌های زمان سیر که مبتنی بر نظریه پرتو و استفاده از تقریب‌های بسامد زیاد برای حل معادلات‌اند و اثرات ارزشمند مولفه‌های کم‌بسامد را نادیده می‌گیرند، روش‌های شکل موج از حل کامل معادله موج بهره می‌برند و از هیچ‌گونه تقریبی برای مدل‌سازی استفاده نمی‌کنند. از این رو می‌باید بین نتایج حاصل از برش‌نگاری زمان سیر و شکل موج تمایز قائل شد (امینی، ۱۳۹۰).

از روش‌های برش‌نگاری زمان سیر به سبب سادگی نظریه پرتو، به‌صورت گسترده‌ای در تفسیر داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود حال آنکه به علت پیچیدگی‌های

آکوستیک  $\mathbf{u}$  مفهوم فشار و در حالت کشسان  $\mathbf{u}$  سرعت ارتعاش لرزه در راستای عمودی و افقی خواهد بود.  $t$  زمان و  $\mathbf{x}$  نیز مختصات مکانی است. در حیطه بسامد معادله موج را می توان به صورت دستگاه معادله خطی نوشت به صورتی که جملات سمت راست معادله مربوط به چشمه و جواب این معادله خطی میدان موج باشد. چنین دستگاهی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, \omega)\mathbf{u}(\mathbf{x}, \omega) = \mathbf{s}(\mathbf{x}, \omega) \quad (2)$$

که در اینجا، ماتریس  $\mathbf{B}$ ، ماتریس امپدانس است. ماتریس  $\mathbf{B}$  ماتریسی تنک و مختلط است که عموماً ساختاری متقارن دارد. هرچند استفاده از شرایط مرزی جاذب در لبه های مدل باعث از بین رفتن تقارن آن می شود. معادله (۲) را می توان با استفاده از تجزیه ماتریس  $\mathbf{B}$  به عناصر پایین و بالا مثلثی (LU) حل کرد که این امر نیازمند استفاده از روش های حل مستقیم است. خوبی استفاده از روش های حل مستقیم آن است که وقتی ماتریس  $\mathbf{B}$  به عناصر پایین و بالا مثلثی تجزیه شده و می توان معادله (۲) را برای چندین چشمه با جای گذاری های مستقیم و معکوس حل کرد. یک مزیت استفاده از روش تبدیل فوریه گسسته آن است که می توان هر تعداد مولفه بسامدی دلخواه را بدون نیاز به محاسبات اضافی به دست آورد (امینی و جواهریان، ۲۰۱۱).

۲-۲ مسئله FWI به منزله یک مسئله بهینه سازی

محلی کمترین مربعات

بردار عدم برازش به صورت  $\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{d}_{\text{cal}}(\mathbf{m})$  تعریف می شود.  $\Delta \mathbf{d}$  برداری به ابعاد  $N$  است که تفاوت مقادیر اندازه گیری شده با گیرنده ها ( $\mathbf{d}_{\text{obs}}$ ) و داده های حاصل از مدل سازی لرزه ای  $\mathbf{d}_{\text{cal}}(\mathbf{m})$  به ازای هر جفت چشمه و گیرنده را شامل می شود. مدل  $\mathbf{m}$  نیز نماینده بعضی از پارامترهای فیزیکی زمین مورد بررسی است. در ساده ترین حالت که مربوط به تقریب تک پارامتری

روش تفاضل متناهی و یا سایر روش های موجود باشد (امینی و جواهریان، ۲۰۱۱).

در ادامه ابتدا گردش کار روش وارون سازی داده های شکل موج مرور می شود و سپس وارون سازی داده های شکل موج روی داده های مصنوعی با هندسه برداشت بین چاهی اجرا و نقش پارامترهای درگیر بررسی می شود. در انتها نیز داده های واقعی مربوط به یک آزمایش بین چاهی واقعی وارون می شود.

## ۲ زمینه نظری

در این قسمت ابتدا مسئله مدل سازی مستقیم که جزء لاینفک FWI است بررسی می شود. مدل سازی دقیق عددی کل میدان موج لرزه ای اساسی ترین بخش الگوریتم های وارون سازی FWI محسوب می شود. در قسمت بعد جنبه های نظری روش های FWI مبتنی بر رهیافت بهینه سازی کمترین مربعات به اختصار بررسی می شود.

## ۱-۲ مدل سازی مستقیم

برای مدل سازی نحوه انتشار موج درون ماده می باید معادله موج را حل کنیم. مناسب ترین روش برای حل مستقیم معادله موج، گسسته سازی آن در حیطه زمان یا بسامد با استفاده از روش های تفاضل متناهی است. هرچند می توان از روش های پیچیده تری نظیر روش المان های محدود، حجم های محدود و مانند آن نیز استفاده کرد. با استفاده از علامت گذاری ماتریسی می توان معادله موج کشسان/آکوستیک را به صورت زیر در حیطه زمان نوشت (ویریوکس و اپرتو، ۲۰۰۹):

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \frac{d^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)}{dt^2} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{s}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

که در اینجا،  $\mathbf{M}$  و  $\mathbf{A}$  به ترتیب ماتریس های جرم و سختی هستند. جمله مربوط به چشمه با  $\mathbf{s}$  نشان داده شده است همچنین  $\mathbf{u}$  نیز نمایانگر میدان موج لرزه ای است. در حالت

### ۳ روند انجام کار

طی سال‌های گذشته با توجه به جدید بودن روش FWI و پیچیدگی‌های ذاتی و محاسباتی آن، اکثر محققان این روش را برای مدل‌های مصنوعی دویعدی به کار برده‌اند. با وجود این به سبب جذابیت‌های این روش، موارد اعمال آن روی داده‌های واقعی نیز روندی رو به رشد داشته است. اکثر محققان در تحقیقات اخیر خود برای وارون‌سازی شکل موج داده‌های واقعی با مقیاس‌ها و هندسه‌های برداشت گوناگون از تقریب معادله موج آکوستیکی استفاده کرده و مدل سرعت امواج P را به دست آورده‌اند (امینی، ۱۳۹۰). هرچند اعتبار استفاده از تقریب آکوستیکی زیر سؤال است اما برتری محاسباتی آن نسبت به حالت کشسان باعث شده است که به صورت گسترده‌ای در FWI داده‌های واقعی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این از آنجا که فقط یک نوع پارامتر  $V_p$  درگیر وارون‌سازی FWI آکوستیک می‌شود فرایند وارون‌سازی نسبت به حالت کشسان خوش‌رفتارتر می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه عموماً چشمه‌های مورد استفاده در لرزه‌نگاری به صورت ضربه‌ای و نیروی قائم عمل می‌کنند، امواج برشی اندکی نیز تولید می‌کنند. از طرف دیگر در روش FWI معمولاً فازهای اولیه لرزه‌نگاشت که بیشتر مربوط به امواج P هستند، وارون می‌شوند که همه این موارد بر اعتبار استفاده از تقریب آکوستیک می‌افزایند. از این رو پیش‌پردازش داده‌های واقعی به منظور اعمال FWI ضروری است. هدف از پیش‌پردازش آماده‌سازی لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده و اعمال بعضی تصحیحات روی دامنه داده‌ها است به گونه‌ای که با تقریب آکوستیک مورد استفاده در مدل‌سازی هماهنگی بیشتری ایجاد شود (امینی، ۱۳۹۰).

### ۴ نتایج

#### ۴-۱ FWI برای مدل مصنوعی

مدل‌های مصنوعی برای آزمودن درستی عملکرد روش FWI و نحوه تنظیم پارامترها کمک شایانی می‌کنند. در

آکوستیک است، پارامتر مدل، سرعت امواج P در هر نقطه از شبکه گسسته‌سازی شده مورد استفاده در وارون‌سازی است. در اینجا  $C(m)$  در حکم نرم کمترین مربعات بردار عدم برازش ( $\Delta d$ ) تعریف می‌شود که به منزله تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$C(m) = \frac{1}{2} \Delta d^T \Delta d \quad (۳)$$

کد علامت † نشانگر عملگر الحاقی (مزدوج ترانهاده) است. مقدار کمینه تابع عدم برازش  $C(m)$  در همسایگی مدل اولیه  $m_0$  پاسخ مسئله است. از دیدگاه تقریب برون مدل بهینه شده  $m$  به ابعاد  $M$  را می‌توان به صورت مجموع مدل اولیه  $m_0$  به اضافه جمله نمو  $\Delta m$  نوشت:

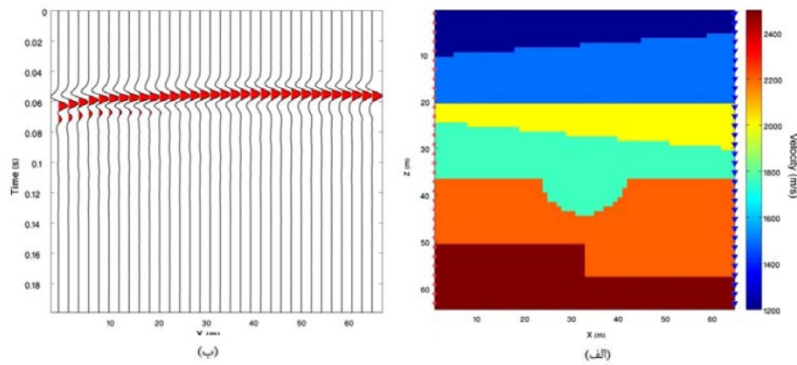
$$\Delta m: m = m_0 + \Delta m$$

غیر خطی بودن FWI محققان را بر آن داشت که دست به ابداع روش‌های چندمقیاسی سلسله مراتبی برای غلبه بر غیر خطی بودن مسئله بزنند. جدا از کارایی محاسباتی، انعطاف روش‌های حیطه زمان یا حیطه بسامد در اجرای رهیافت چندمقیاسی مهم‌ترین برتری یک حیطه نسبت حیطه دیگر محسوب می‌شود. در رهیافت چندمقیاسی، داده‌ها به زیرمجموعه‌هایی برحسب محتوای بسامدیشان تقسیم‌بندی شده و این زیرمجموعه‌های بسامدی به تدریج از بسامد کم به بسامد زیاد در فرایند وارون‌سازی وارد می‌شوند. از آنجا که تابع عدم برازش به‌ازای مولفه‌های کم‌بسامد رفتار خطی‌تری دارد، فرایند وارون‌سازی از مولفه‌های کم‌بسامد آغاز می‌شود و به تدریج مولفه‌های بسامد زیاد نیز وارد فرایند وارون‌سازی می‌شوند. هرچند چنین کاری در حیطه زمان نیز قابل اجرا است اما حیطه بسامد به صورت طبیعی و ذاتی چارچوب کاری مناسبی را برای رهیافت چندمقیاسی فراهم می‌سازد. در حیطه بسامد می‌توان تک‌مولفه‌های بسامدی یا گروهی از چندین مولفه بسامدی را به صورت هم‌زمان وارون کرد (امینی، ۱۳۹۰).

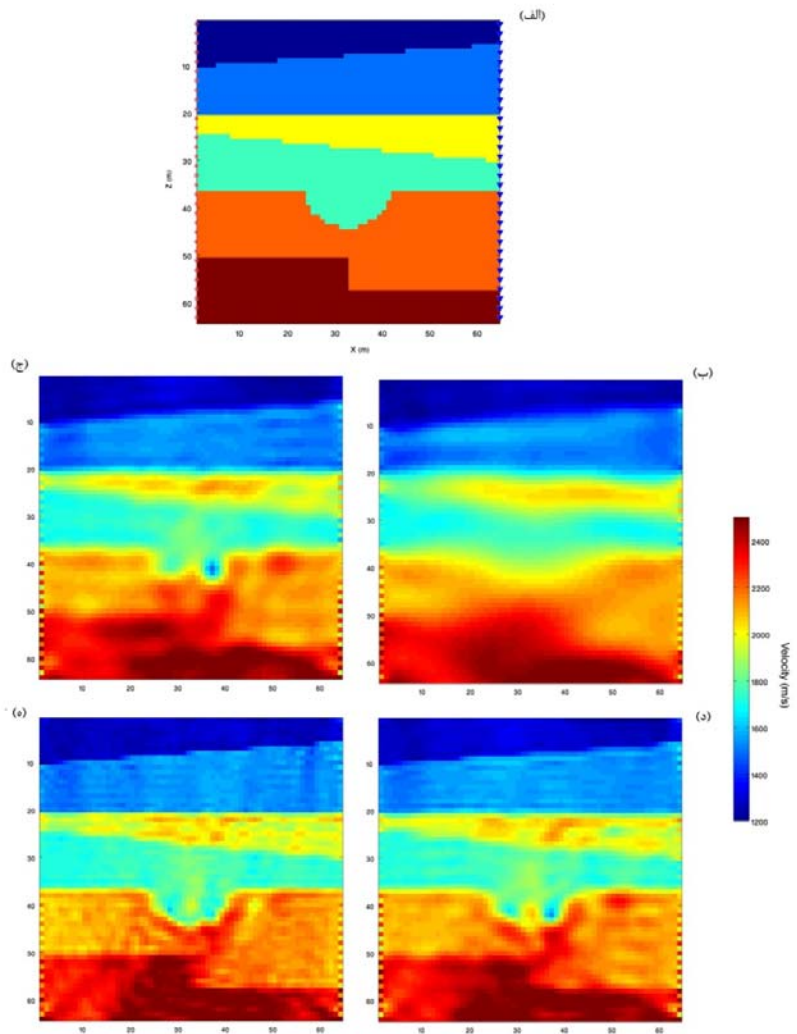
این بخش به وارون‌سازی مدل‌های دو بُعدی با هندسه برداشت بین‌چاهی پرداخته و نتایج اعمال FWI روی آنها بررسی می‌شود. مدل دو بُعدی مورد استفاده در این بخش را غلامی و سیاه‌کوهی (۲۰۱۰) معرفی کرده‌اند که شامل ساختارهای لایه‌ای شیب‌دار و نیم‌دایره و نمایانگر یک کانال مدفون و گسل است (شکل ۱-الف). سرعت لایه‌ها در سطح به حدود ۱۲۰۰ متر بر ثانیه و در عمق به بیش از ۲۵۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. ابعاد این مدل از لحاظ ریاضی  $128 \times 128$  نقطه شبکه است. برای مدل‌سازی بهینه با کمترین خطای عددی فواصل نقاط شبکه  $0.5$  متر انتخاب و با استفاده از حل معادله موج آکوستیک در حیطه بسامد داده‌های مشاهده تولید شد. به منظور جلوگیری از بازتاب ناشی از کرانه‌های مدل عرض ناحیه PML،  $40$  نقطه شبکه انتخاب شد. هندسه برداشت از نوع عبوری است. طبق شکل تعداد  $32$  چشمه با فواصل منظم دو متری در لبه سمت چپ مدل قرار دارند و تعداد  $32$  گیرنده نیز در لبه سمت راست واقع شده است. شکل ۱-ب یک لرزه‌نگاشت چشمه مشترک نظیر چشمه شماره ۱۰ را نشان می‌دهد. به منظور اعمال FWI مولفه‌های بسامدی به شرح جدول ۱ انتخاب شدند و وارون‌سازی به‌ازای هر کدام از این مولفه‌ها صورت پذیرفت. حداکثر میزان تکرارهای بهینه‌سازی برای هر مولفه بسامدی نیز  $10$  بار انتخاب شد. نتایج وارون‌سازی در شکل ۲ نمایش داده شده است. مدل اولیه مورد استفاده برای آغاز فرایند وارون‌سازی یک مدل با سرعت ثابت  $1800$  متر بر ثانیه بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود علی‌رغم کم بودن تعداد چشمه‌ها و گیرنده‌ها، دور بودن مدل اولیه از مدل واقعی و همچنین تعداد محدود مولفه‌های بسامدی به کار رفته، مدل واقعی به‌خوبی بازسازی شده است. طبق جدول ۱ اولین مولفه بسامدی که وارون شده مولفه  $9/8$  هرتز بوده است و در ادامه  $9$  مولفه بسامدی به‌ترتیب وارون شده‌اند و نتیجه هر مرحله به مثابه مدل اولیه مرحله بعدی مورد استفاده

قرار گرفته است. شکل ۲-ب نتیجه وارون‌سازی مولفه  $19/6$  هرتز را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ابتدا ساختارهای با طول موج بلند بازسازی می‌شوند و به تدریج با وارون کردن مولفه‌های بسامدی بیشتر، ساختارهای با طول موج کوتاه‌تر کامل می‌شوند و جزئیات مدل ساخته می‌شود. شکل ۳، RMS تابع هدف را در مراحل ده‌گانه بهینه‌سازی به‌ازای مولفه‌های بسامدی نمایش می‌دهد.

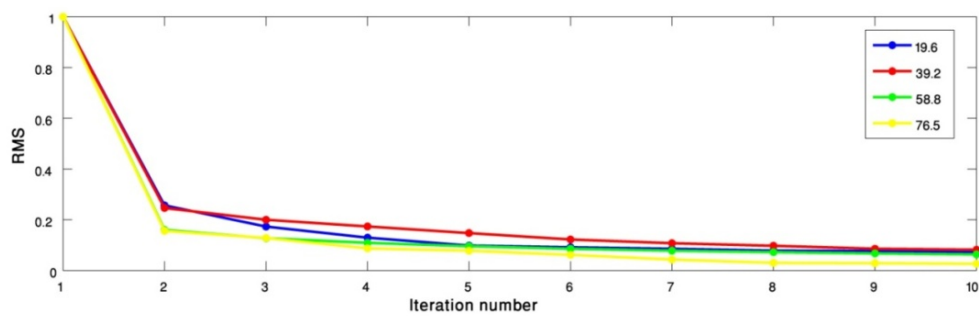
یکی از عامل‌های مهم و تاثیرگذار در وارون‌سازی نوفه موجود در داده‌ها است که باعث مغشوش شدن نتایج می‌شود. به منظور بررسی تاثیر نوفه در پاسخ FWI مدل کانال مدفون با هندسه برداشت عبوری  $32$  تایی در نظر گرفته و به داده‌های مشاهده به میزان پنج درصد نوفه اضافه شده است. نتایج وارون‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نوفه باعث به وجود آمدن نتایج مغشوش در وارون‌سازی می‌شود که این امر در مولفه‌های بسامدی بزرگ‌تر بارزتر است. علت آن است که نوفه اضافه شده نوفه‌ای سفید است و همه مولفه‌های بسامدی را به‌صورت یکسان مغشوش می‌کند. از آنجا که داده‌های لرزه‌ای از لحاظ بسامدی باند محدودی دارند و مولفه‌های کم‌بسامد نسبت به مولفه‌های بزرگ‌تر دامنه بزرگ‌تری دارند، از این رو اضافه کردن نوفه سفید مولفه‌های بسامدی بزرگ‌تر را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد (شکل ۵). از آنجا که در روش FWI مولفه‌های بسامدی به‌ترتیب از پایین به بالا وارون می‌شوند، حضور نوفه تاثیر زیادی در نتایج می‌گذارد که این امر از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. شکل ۶، RMS تابع هدف را در مراحل بهینه‌سازی به‌ازای مولفه‌های بسامدی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در مولفه‌های بسامدی زیاد، همگرایی فرایند بهینه‌سازی مطلوب نیست و پس از دو تکرار متوقف شده است.



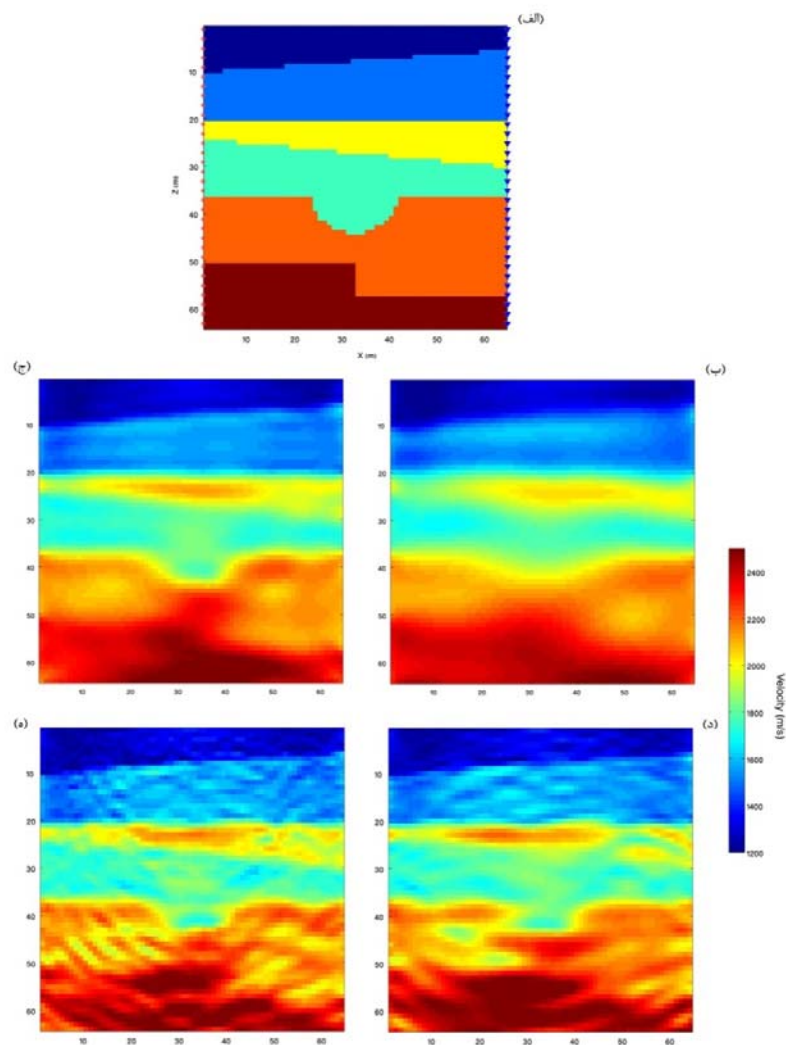
شکل ۱. الف) مدل مصنوعی دوبعدی یک کانال مدفون اقتباس از غلامی و سیاه‌کوهی (۲۰۱۰). طبق شکل، هندسه برداشت از نوع عبوری است. چشمه‌ها با علامت ستاره و گیرنده‌ها با علامت مثلث نمایش داده شده‌اند. ب) لرزه‌نگاشت چشمه مشترک مربوط به چشمه شماره ۱۰ که در گیرنده‌های واقع در سمت راست ثبت شده است.



شکل ۲. نتایج FWI برای مدل مصنوعی یک کانال مدفون. الف) مدل واقعی و هندسه برداشت عبوری. تعداد چشمه‌ها و گیرنده‌ها هرکدام ۳۲ عدد است. ب) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۱۹/۶ هرتز. ج) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۳۹/۲ هرتز. د) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۵/۸ هرتز. ه) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۷/۶/۵ هرتز.

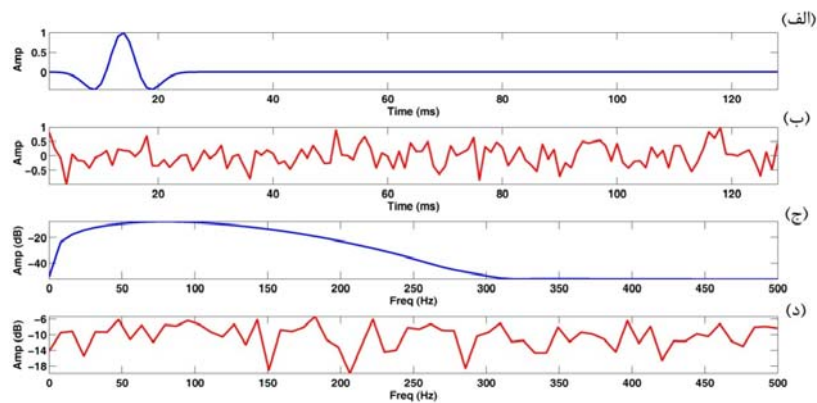


شکل ۳. RMS تابع هدف به ازای مولفه‌های بسامدی متفاوت طی تکرارهای گوناگون بهینه‌سازی مربوط به وارون‌سازی داده‌های دو بُعدی نمایش داده شده در شکل ۲.

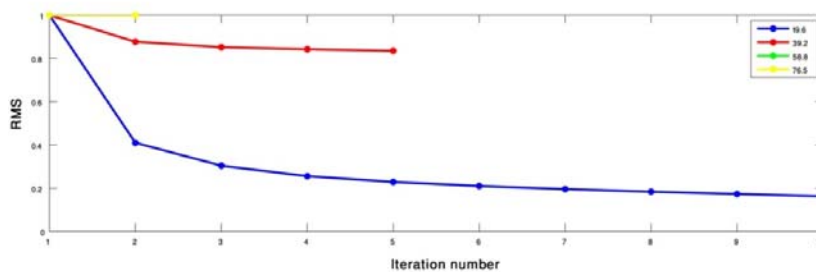


شکل ۴. نتایج FWI برای مدل یک کانال مدفون برای حالت داده‌های حاوی نوفه. (الف) مدل واقعی و هندسه برداشت عبوری. تعداد چشمه‌ها و گیرنده‌ها هر کدام ۳۲ عدد است. (ب) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۱۹/۶ هرتز. (ج) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۳۹/۲ هرتز. (د) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۵۸/۸ هرتز. (ه) نتیجه وارون‌سازی مولفه ۷۶/۵ هرتز.





شکل ۵. (الف) لرزه‌نگاشت در حیطه زمان. (ب) نوفه سفید در حیطه زمان. (ج) لرزه‌نگاشت در حیطه بسامد. (د) نوفه سفید در حیطه بسامد. مقیاس زمان و بسامد نرمال شده است.



شکل ۶. RMS تابع هدف به ازای مولفه‌های بسامدی متفاوت طی تکرارهای گوناگون بهینه‌سازی مربوط به وارون‌سازی داده‌های دوبعدی نمایش داده شده در شکل ۵.

جدول ۱. فهرست مولفه‌های بسامدی وارون شده و تکرارهای بهینه‌سازی در مثال دوبعدی یک کانال مدفون.

Group	1	2	3	4	5	6	7	8
Frequencies (Hz)	9.8	19.6	29.4	39.2	49.0	58.8	68.6	76.5
Iterations	10	10	10	10	10	10	10	10

گمانه‌ها را به بیرون گمانه‌ها تعمیم دهد. در این تحقیق نقشه سرعتی حاصل از برش‌نگاری درحکم ابزاری برای تصمیم‌گیری در مورد توزیع خصوصیات کشسانی و استحکام نسبی سنگ‌های بین دو گمانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین بررسی کارایی این روش در این گونه تحقیقات نیز موردنظر بررسی کنندگان بوده است. یکی از گمانه‌ها (گمانه ۱) در سال‌های قبل به‌منظور تعیین سطح ایستابی حفر شده بوده است که در این تحقیق با توجه به

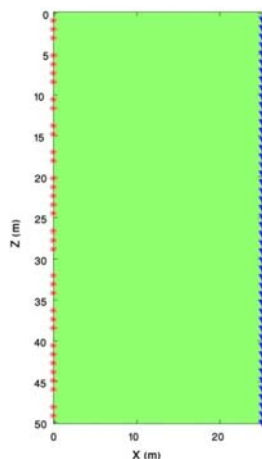
#### ۲-۴ FWI برای مدل واقعی

در این بخش داده‌های مربوط به یک آزمایش بین‌چاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحقیق در سال ۲۰۰۲ در کشور چین صورت گرفته است. هدف از این بررسی، تعیین خصوصیات کشسانی محیط بین دو گمانه و تصویرسازی ساختارهای زمین‌شناسی به‌منظور اجرای عملیات عمرانی و بررسی استحکام لایه‌ها بوده است. برش‌نگاری می‌تواند مشاهدات مستقیم صورت گرفته در

به منظور وارون‌سازی، ابتدا داده‌ها از قالب SEGY خوانده و سپس لرزه‌نگاشت‌های معیوب و با نوفه زیاد حذف می‌شوند. همانند حالت قبل داده‌ها می‌باید پیش‌پردازش شوند تا با شرایط تقریب آکوستیکی به کار رفته در مدل‌سازی تطابق ایجاد شود. برای این منظور مراحل زیر روی داده‌ها اعمال شد:

۱- اعمال پنجره زمانی به طول ۱۵ میلی‌ثانیه روی لرزه‌نگاشت‌ها. این پنجره فقط به بسته انرژی اولیه حاوی امواج P اجازه حضور می‌دهد و سایر مدهایی را که با تاخیر ثبت شده‌اند به دور می‌ریزد. هدف از اعمال این پنجره زمانی، حذف مدهایی است که تقریب آکوستیکی، توانایی مدل‌سازی آنها را ندارد.

۲- متعادل کردن دامنه لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده. هدف از این کار حذف اثر تضعیف داده‌های لرزه‌ای با سازوکار جذب است. از آنجا که در روش حاضر، ضریب جذب مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، اثر تضعیف داده‌های لرزه از روی لرزه‌نگاشت‌ها حذف می‌شود؛ به گونه‌ای که فقط اثر واگرایی هندسی روی داده‌ها باقی می‌ماند. البته شایان ذکر است این مرحله در مورد برداشت‌های با دهانه بزرگ، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.



شکل ۷. هندسه برداشت داده‌های بین‌چاهی مورد استفاده در وارون‌سازی. فاصله دو گمانه ۲۵ متر و عمق آنها نیز ۵۰ متر است. گیرنده‌ها در گمانه سمت راست و چشمه‌ها در گمانه سمت چپ قرار دارند.

قطر کم آن درحکم گمانه محل استقرار چشمه استفاده شده است. به منظور برداشت داده‌های بین‌چاهی در فاصله ۲۵ متری این گمانه، گمانه شماره ۲ نیز به عمق ۵۰ متر حفر شد که از آن به منظور استقرار گیرنده‌ها استفاده شده است. چشمه لرزه‌ای مورد استفاده در این آزمایش از نوع اسپارکر بوده است که با توجه به قابلیت تکرارپذیری و همچنین محتوای بسامدی زیاد گزینه مناسبی است. همچنین از رشته ۲۴ تایی هیدروفن نیز به منظور ثبت لرزه‌نگاشت‌ها در گمانه شماره ۲ استفاده شده است. فاصله بین هیدروفن‌ها در این رشته یک متر بوده است. برای برداشت داده‌ها نیز از یک دستگاه لرزه نگار ۲۴ کانال با فاصله نمونه‌برداری ۱۲۸ میلی‌ثانیه استفاده شده است. در گمانه شماره ۲، تعداد ۴۸ گیرنده قرار دارد و در چاه شماره ۱ امواج لرزه‌ای در ۳۵ نقطه عمقی متفاوت ایجاد شده است (شکل ۷).

فاصله بین نقاط چشمه نیز تقریباً حدود ۲ متر است. یک نمونه از برداشت چشمه مشترک مربوط به چشمه شماره ۱۹ واقع در عمق ۲۴ متری در شکل ۸ نمایش داده شده است.

ساختار زمین‌شناسی منطقه از عمدتاً از نوع رسوبات آواری تریاسیک شامل توالی‌های ماسه‌سنگی- رُسی است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد برای اجرای این بررسی فقط یک گمانه حفر شد (گمانه ۲) و از این رو اطلاعات حفاری فقط برای این گمانه در قالب لاگ حفاری موجود است. اطلاعات این گمانه حاصل بررسی خرده‌های حفاری است که پیمانکار حفاری آن را تهیه کرده است و با توجه به نوع حفاری و ماهیت آن دقت کافی ندارد و فقط می‌تواند اطلاعات نسبی از لایه‌بندی به دست دهد. طبق لاگ حفاری داده شده، خرده‌های حفاری را می‌توان در سه دسته عمده تقسیم‌بندی کرد: A: گل‌سنگ، B: ماسه‌سنگ رُسی و C: ماسه‌سنگ ریزدانه (شکل ۹).

نتایج وارون‌سازی داده‌های بین‌چاهی نیز در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختارهای پُرسرعت و کم‌سرعت به‌خوبی از هم تفکیک شده‌اند و قدرت تفکیک به‌نحو محسوسی نسبت به برش‌نگاری زمان سیر (شکل ۱۰) بهبود پیدا کرده است.

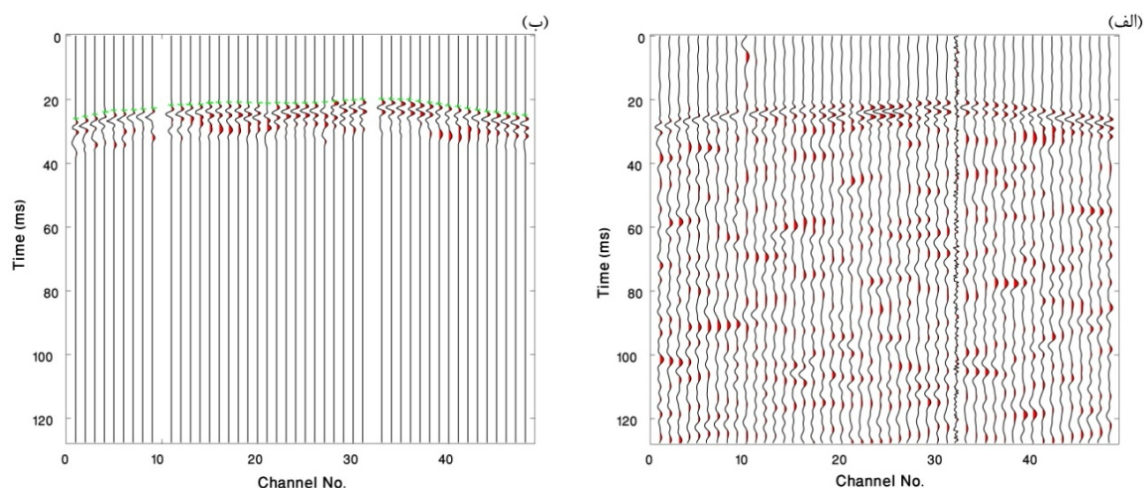
به‌منظور بررسی تطابق نتایج برش‌نگاری در این طرح در گمانه شماره ۲ آزمایش درون‌چاهی نیز صورت گرفته است (قطر کم گمانه شماره ۱ مانع از اجرای این آزمایش در آن شده است). با توجه به اینکه نتایج آزمایش درون‌چاهی دقت قابل‌قبولی در محل گمانه دارد، می‌توان از آن در حکم ابزار اعتبارسنجی نتایج برش‌نگاری در محل گمانه استفاده کرد. برای این منظور از همان دسته ۲۴ تایی هیدروفن‌ها استفاده شده و با استفاده از ضربه پتک روی سطح زمین در مجاورت دهانه گمانه شماره ۲، امواج لرزه‌ای ایجاد شده است. در ادامه با خوانش زمان سیر امواج پایین‌رونده اولیه در اعماق متفاوت، سرعت بازه‌ای امواج P در محل این گمانه به‌دست آمده است (شکل ۱۱). همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، همبستگی مناسبی بین نتایج برش‌نگاری و داده‌های بین‌چاهی وجود دارد. هرچند همبستگی قوی بین داده‌های لاگ حفاری و نتایج بررسی‌های لرزه‌ای دیده نمی‌شود ولی تغییرات سرعت در گمانه پیش‌گفته، به‌نوعی با تغییر توالی‌های مشاهده شده در لاگ حفاری در ارتباط است؛ به‌خصوص نواحی پُرسرعت با توالی‌های سه‌گانه همبستگی معنی‌داری دارند. طبق نتایج برش‌نگاری تغییرات جانبی سرعتی بین دو گمانه مشاهده می‌شود به‌طوری‌که با نزدیک شدن به گمانه شماره ۱، مقادیر سرعت افزایش پیدا می‌کند؛ و این امر موید افزایش خصوصیات کشسانی و در نتیجه استحکام لایه‌ها در این راستا است.

شکل ۸ به‌صورت نمونه برداشت چشمه مشترک پیش‌گفته را پس از مراحل پیش‌پردازش نشان می‌دهد. به‌منظور مدل‌سازی، زمین به بلوک‌هایی به ابعاد ۰/۲۵ متر تقسیم‌بندی شده است. این فاصله به‌گونه‌ای انتخاب شده است که کمترین خطای عددی در مدل‌سازی پدید آید. بدین‌ترتیب ابعاد ریاضی مدل نیز  $100 \times 200$  نقطه شبکه می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی محاسبات به کمک رهیافت زیرفضا، بین فضای پارامترها در حیطه مدل‌سازی (تفاضل متناهی) و وارون‌سازی یک تناظر چهار به یک برقرار شده است، به‌گونه‌ای که تعداد پارامترها در فضای وارون‌سازی  $50 \times 100$  عدد است.

مدل اولیه موردنیاز برای آغاز فرایند وارون‌سازی نیز از برش‌نگاری زمان سیر داده‌های ثبت شده به‌دست آمد. برای این کار زمان رسید اولین رسیده‌ها روی لرزه‌نگاشت‌ها پیک شد (شکل ۸) و پس از آن با استفاده از یک الگوریتم وارون‌سازی داده‌های زمان سیر مدل اولیه سرعتی به‌دست آمد (شکل ۱۰).

به‌منظور وارون‌سازی، مولفه‌های بسامدی به شرح جدول ۲ انتخاب شدند. همانند مثال یک‌بعدی به‌منظور سرکوب نوفه‌های تصادفی وارون‌سازی هم‌زمان چند مولفه بسامدی مورد استفاده قرار گرفت. بدین‌ترتیب چهار گروه بسامدی انتخاب شد که هر یک سه مولفه بسامدی را در بر می‌گیرند و روندی افزایشی دارند. تعداد مراحل بهینه‌سازی نیز در هر گروه ۱۰ مرحله انتخاب شده است.

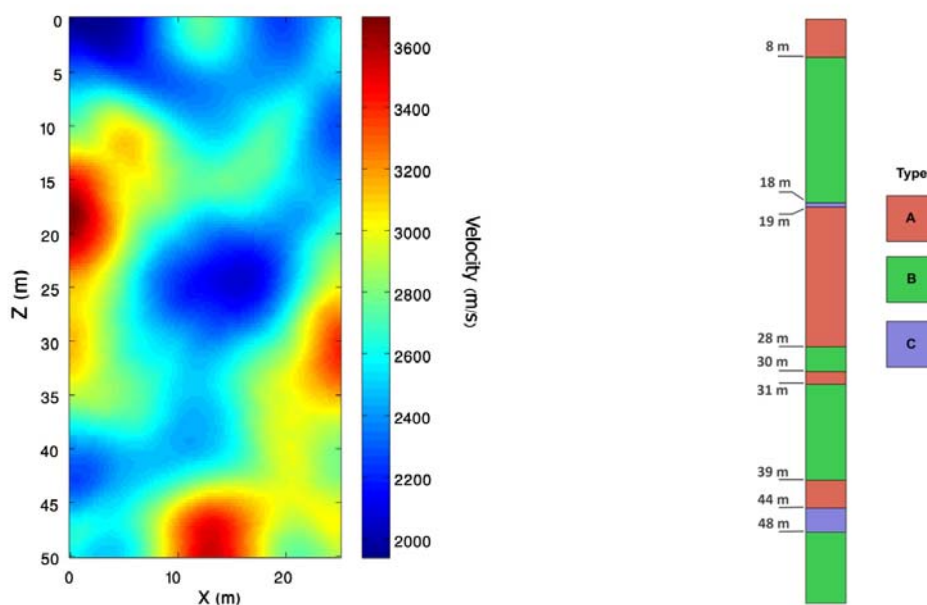
با توجه به وجود چهار گروه بسامدی که هر یک شامل سه مولفه بسامدی هستند، تعداد مولفه‌های بسامدی مورد استفاده در وارون‌سازی ۱۲ عدد خواهد بود. به‌این‌ترتیب با استفاده از تبدیل فوری، لرزه‌نگاشت‌های زمان سیر به حیطه بسامد برده و مولفه‌های بسامدی نظیر جدول ۲ در حکم داده‌های مشاهده استخراج می‌شوند.



شکل ۸. (الف) یک برداشت چشمه مشترک مربوط به چشمه شماره ۱۹ واقع در عمق ۲۴ متری. (ب) برداشت چشمه مشترک پس از اعمال پیش پردازش. زمان رسید اولیه‌ها نیز با نشانگر سبز رنگ روی هر لرزه نگاشت نمایش داده شده است.

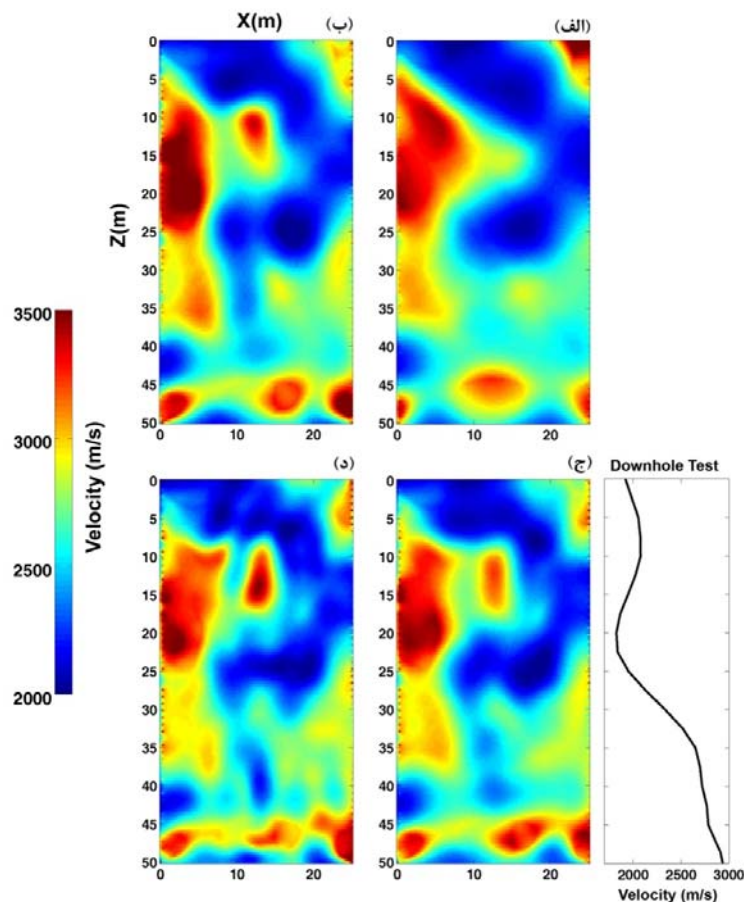
جدول ۲. فهرست مولفه‌های بسامدی وارون شده و تکرارهای بهینه‌سازی در داده‌های واقعی بین چاهی.

Group	1	2	3	4
Frequencies (Hz)	(5.3, 10.3, 15.3)	(20.1, 30.1, 40.1)	(50.7, 70.7, 90.7)	(100.2, 200.2, 300.2)
Iterations	10	10	10	10



شکل ۹. لاگ حفاری گمانه شماره ۲ مربوط به محل استقرار گیرنده‌ها. تحلیل خرده‌های حفاری نشان‌دهنده وجود توالی سه دسته عمده رسوبات آواری است، A: گل سنگ، B: ماسه سنگ رسی، C: ماسه سنگ ریزدانه.

شکل ۱۰. مدل اولیه مورد نیاز برای FWI حاصل از برش‌نگاری زمان سیر داده‌های ثبت شده.



شکل ۱۱. نتایج FWI برای آزمایش بین‌چاهی واقعی. (الف) نتیجه وارون‌سازی گروه بسامدی شماره ۱. (ب) نتیجه وارون‌سازی گروه بسامدی شماره ۲. (ج) نتیجه وارون‌سازی گروه بسامدی شماره ۳. (د) نتیجه وارون‌سازی گروه بسامدی شماره ۴. نتایج آزمایش درون‌چاهی در گمانه مربوط به گیرنده نیز در پایین سمت راست نمایش داده شده است.

نوفه برای مولفه‌های کم‌بسامد بیشتر از مولفه‌های با بسامد زیاد است، از این رو وارون‌سازی مولفه‌های بسامد زیاد، همواره با مشکلاتی همراه است که از نقاط ضعف این روش محسوب می‌شود. در مورد داده‌های واقعی به علت ساده‌سازی‌های منظور شده در مدل‌سازی آکوستیکی، می‌باید داده‌ها را با مراحل پیش‌پردازشی تا حد ممکن به شرایط مدل‌سازی نزدیک کرد.

#### مراجع

امینی، ن.، ۱۳۹۰، استفاده از روش زیرفضای تعمیم‌یافته در توموگرافی شکل موج، رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک

#### ۵ نتیجه‌گیری

همان‌طور که در وارون‌سازی داده‌های مصنوعی و واقعی دیده می‌شود، فقط با استفاده از شمار محدودی از مولفه‌های بسامدی نتیجه مطلوب حاصل می‌شود. از آنجا که در برش‌نگاری شکل موج تابع هدف ناهموار است، از این رو انتخاب مدل اولیه نقش بسزایی در موفقیت روش دارد. همچنین به سبب اینکه تابع هدف به‌ازای مولفه‌های کم‌بسامد هموارتر است، بهتر است طبق رهیافت چندمقیاسی، وارون‌سازی را از مولفه‌های کم‌بسامد آغاز کرد و به تدریج به سمت مولفه‌های بزرگ‌تر رفت. در داده‌های لرزه‌ای با باند بسامد محدود، نسبت سیگنال به

- Conference on Inverse Scattering, Theory and Application, Society for Industrial and Applied Mathematics, Expanded Abstracts, 206–220.
- Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation, *Geophysics*, **49**, 1259-1266.
- Virieux, J. and Operto, S., 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics, *Geophysics*, **74**, WCC1–WCC26.
- Williamson, P. R., 1991, A guide to the limits of resolution imposed by scattering in ray tomography, *Geophysics*, **56**, 202-207.
- Williamson, P. R. and Worthington, M., 1993, Resolution limits in ray tomography due to wave behavior, Numerical experiments, *Geophysics*, **58**, 727-735.
- دانشگاه تهران.
- Amini, N. and Javaherian, A., 2011, A MATLAB-based frequency-domain finite-difference package for solving 2D visco-acoustic wave equation, *Waves in Random and Complex Media*, **21**, 161-183.
- Claerbout, J., 1971, toward a unified theory of reflector mapping, *Geophysics*, **36**, 467-481.
- Claerbout, J., 1976, *Fundamentals of geophysical data processing*, McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Gholami, A. and Siahkoohi, H. R., 2010, Regularization of linear and nonlinear geophysical ill-posed problems with joint sparsity constraints, *Geophys. J. Int.*, **180**, 871-882.
- Lailly, P., 1983, The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations,