

# مدل سازی ناهمگنی جانبی سرعت در توموگرافی لرزه‌ای با تعریف تابع‌های سرعت اولیه متفاوت

مصطفی وحیدهاشمی و مهرداد سلیمانی\*

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۲۲)

## چکیده

در این تحقیق، از روش جدید توموگرافی موج نرمال در نقطه ورود در تهیه مدل سرعت کوچ استفاده شده است. روش پیش گفته از نشانگرهای جنبشی میدان موج برای تهیه مدل سرعت استفاده می‌کند. این نشانگرها از داده‌های پیش از برانبارش استخراج می‌شوند. در روش توموگرافی موج ورود نرمال، فرض شده است که سرعت لحظه‌ای با عمق به صورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به فقدان دقت در فرض فوق، در این تحقیق از چهار تابع تغییر سرعت با عمق به همراه سرعت برانبارش در مدل سرعت اولیه در این روش استفاده شد. سپس برنامه رایانه‌ای تابع‌های پیش گفته با اعمال تغییرات لازم به منظور در نظر گرفتن تغییرات جانبی سرعت، به منزله مدل سرعت اولیه تهیه و در روش توموگرافی موج ورود نرمال روی داده‌های مصنوعی یک‌بعدی و دوبعدی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج وارون سازی یک‌بعدی نشان داد که مدل سرعت تدریجی نهایی پس از ۱۲ تکرار حاصل می‌شود که خیلی به مدل واقعی نزدیک است. همچنین خطای بازسازی تعیین عمق بازتابنده کمتر از ۷ متر به دست آمد. در ادامه، از تابع‌های سرعت پیش گفته روی مدل دوبعدی مصنوعی استفاده شد. این مدل شامل بی‌هنجاری‌های سرعت نزدیک به یکدیگر و تغییرات جانبی سرعت بود. مدل‌های نهایی روشن ساخت که استفاده از تابع تغییرات خطی سرعت که تاکنون از آن استفاده می‌شد و همچنین تابع‌هایی که در سایر تحقیقات معرفی شده‌اند، جواب‌های قابل قبولی به دست نخواهد داد. در ادامه، این روش روی یک داده واقعی اعمال شد. این داده دارای تغییرات ساختاری و سنگ‌شناسی پیچیده‌ای بود که بدین ترتیب توانایی مدل‌های سرعت در تهیه مقاطع کوچ با کیفیت قابل قبول را به خوبی مورد آزمون قرار می‌دهد. همه مدل‌های سرعت عنوان شده برای این داده به دست آمد و سپس با استفاده از هر مدل سرعت، مقطع کوچ پس از برانبارش برای آنها تهیه شد. در ادامه با توجه به حساسیت بیشتر کوچ پیش از برانبارش به مدل سرعت، دو مدل سرعت با تغییرات خطی و برانبارش برای کوچ پیش از برانبارش انتخاب شدند. در نهایت مدل سرعت با مدل اولیه سرعت برانبارش، عملکرد بهتری از خود نشان داد. به منظور مقایسه این مدل، کوچ پیش از برانبارش با روش تحلیل سرعت و کوچ برای این داده نیز به دست آمد و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شد. اگرچه مقاطع کوچ به دست آمده به هر دو روش تفاوت چندانی نداشت، ولی مدل سرعت به دست آمده به روش NIP توموگرافی، بسیار ساده‌تر بود و در زمان بسیار کمتری نسبت به مدل پیچیده به دست آمده با روش تحلیل سرعت کوچ، تهیه شد. در نهایت استفاده از سرعت برانبارش در حکم مدل اولیه در توموگرافی موج ورود نرمال به منزله بهترین مدل اولیه پیشنهاد شد.

**واژه‌های کلیدی:** تهیه مدل سرعت، توموگرافی بازتابی، سطح بازتاب مشترک، موج ورود نرمال، وارون سازی NIP توموگرافی

## Lateral velocity heterogeneities modelling in seismic tomography by introducing different initial velocity models

Mustafa Vahid Hashemi and Mehrdad Soleimani\*

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, University of Shahrood, Iran

(Received: 27 April 2013, accepted: 14 October 2014)

\*Corresponding author:

msoleimani@shahroodut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

Velocity model building is a crucial step for construction of seismic image of the subsurface in depth imaging. A wide variety of different velocity model building methods are available. Reflection tomography is one of those methods. One of the drawbacks of tomography method is that it requires picking reflection events in the prestack data. Picking procedure is extremely time consuming and can become difficult if the signal to noise ratio in the data is low. In this study, a new version of tomography called Normal Incidence Point (NIP) wave tomography is used for construction of velocity model. This technique makes use of traveltimes information in the form of kinematic wavefield attributes. These attributes are coefficients of the second order traveltimes approximations in the midpoint and offset coordinates and can be extracted from prestack seismic data by means of common reflection surface stack method. The required input data for NIP tomography inversion are taken from stacked results at number of pick locations, while these locations do not need to follow a continuous horizon in the section. The problem of building the velocity model by tomography method is solved in an iterative manner here. During iterations, difference of observed and modeled data is minimized and the model is updated. This procedure would continue until the misfit falls below a specified value. Modeling observed data for the first time requires an initial velocity model. Initial velocity model in normal incidence point tomography contains a constant near surface velocity which increases linearly with depth. In the present study, four different functions, introduced by different researches, used besides linear function to produce initial velocity model. In addition to these functions, the stacking velocity derived from kinematic wavefield attributes was used in NIP tomography, as initial velocity model. Accuracy and consistency of these velocity models were evaluated by application to a 1D and a 2D synthetic data. Result of these data showed that different initial velocity models due to different functions used in NIP tomography, have different effects on the final velocity model. In 1D data example, the result showed that the NIP tomography method with new velocity function introduced to the tomographic algorithm will give accurate velocity model after little iteration with acceptable error and high consistency with the data. In case of 2D synthetic data example, five different velocity models obtained by normal incidence point tomography with four velocity function besides the stacking velocity as initial velocity model. Different final velocity models obtained here show different ability of functions in handling lateral heterogeneities. However, the velocity functions introduced in other studies showed that besides the importance of initial velocity model in normal incidence point tomography, they could not serve as a suitable initial velocity model. Although these models were consistent with the data, they were not able to separate close velocity anomalies. However, the velocity model obtained by stacking velocity as initial model in normal incidence point tomography shows higher accuracy and consistency with the data and could handle lateral velocity changes in tomographic procedure, too. These techniques were applied to a real dataset. This dataset contains geometric complexity and lithological complexes. Therefore it could clarify the ability of these velocity equations in producing acceptable migrated section. All of the equations used to make velocity model for this dataset are then used for post stack migration. By comparing the migrated section obtained, the linear function and stacking velocity function showed that they could perform better in the presence of lateral velocity heterogeneities. Later on, these two models were used to produce acceptable prestack depth migration sections. The stacking velocity used for the initial model for NIP tomography gave better result in prestack depth migration. This result was compared with the result of conventional prestack depth migration. The velocity model for the latter

case was obtained by the migration velocity analysis technique. Results of both methods were comparable. However, the NIP tomography model was so simple and smooth and also obtained in so much less time compared to the complex migration velocity analysis model.

**Keywords:** Velocity model building, reflection tomography, common reflection surface, normal Incidence point (NIP) tomography inversion

## ۱ مقدمه

پیچیده‌تری مورد نیاز خواهد بود. به علت تنوع زیاد روش‌های موجود برای تهیه مدل سرعت، طبقه‌بندی آنها مشکل است، با این حال در روش‌های پرکاربرد، می‌توان آنها را به صورت زیر دسته‌بندی کرد.

الف- روش‌های مبتنی بر کوچ

۱- استفاده از انحراف رخدادهای لرزه‌ای از حالت تخت در برداشت‌های تصویر مشترک

۲- استفاده از خاصیت تمرکز انرژی در فرایند ادامه درون‌سو

ب- روش‌های مبتنی بر استفاده از اطلاعات زمان‌سیر (توموگرافی)

در روش برآورد مدل سرعت براساس کوچ قبل از برانبارش، میزان هم‌خوانی مدل با داده‌ها، با نتایج کوچ داده‌های قبل از برانبارش به صورت تابعی از دورافت، ارزیابی می‌شود. در یک مدل صحیح، تصاویر عمقی قبل از برانبارش باید مستقل از دورافت باشد. بدین صورت که با افزایش دورافت، رخدادهای مربوط، از حالت افقی خارج نشوند.

یکی دیگر از روش‌های ارزیابی هم‌خوانی مدل ایجاد شده نسبت به داده‌های لرزه‌ای، محاسبه زمان‌سیر رخدادهای بازتابی انتخاب شده است که در داده‌های قبل از برانبارش، دستچین شده‌اند. از مشکلات این روش، تعداد زیاد نقاطی است که برای عمل توموگرافی باید دستچین شوند (بیشاپ و همکاران، ۱۹۸۵). همچنین اگر نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های لرزه‌ای کم باشد، مشخص کردن و انتخاب دستی زمان‌سیرها به مشکل بر می‌خورد و یا حتی غیرممکن می‌شود (الیجیا، ۱۹۸۹؛ بوهم

امروزه از روش‌های گوناگونی برای برآورد مدل سرعت استفاده می‌شود. همگی این روش‌ها، براساس معیار هم‌خوانی با داده‌های لرزه‌ای استوار هستند که تفاوت آنها، در روش‌های اندازه‌گیری این معیار، میزان انحراف مدل از این معیار و چگونگی اعمال اصلاحات روی آن است (الچلیبی، ۱۹۷۳؛ ایر و هیراهارا، ۱۹۹۳؛ رولینسون و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیو و گو، ۲۰۱۲). تهیه تصویر لرزه‌ای از زیر سطح زمین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، نیازمند مدل سرعت لرزه‌ای دقیق است. عموماً، تهیه مدل سرعت انتشار موج در داخل زمین فرایندی بسیار پیچیده است. لذا، همه این روش‌ها از مجموعه‌ای از فرضیه‌ها و ساده‌سازی‌ها درباره زیر سطح زمین برای تهیه مدل سرعت استفاده می‌کنند. از آنجا که خصوصیات جنبشی انتشار امواج لرزه‌ای، تابع‌هایی غیرخطی از سرعت انتشار امواج هستند، همه روش‌های تهیه مدل سرعت، مبتنی بر تکرارند. بدین معنی که یا با به‌روز کردن مدل سرعت اولیه در هر تکرار و یا با پیش رفتن به زیر سطح زمین، به صورت لایه به لایه، مدل سرعتی تهیه می‌شود. باید عنوان کرد که یک روش برآورد مدل سرعت را نمی‌توان در حکم راه حلی برای همه ساختارهای زیرسطحی عرضه کرد؛ بلکه هر روشی در ساختارهای خاص خودش، بهترین برآورد را به دست خواهد داد. برای مثال، در ساده‌ترین حالت که شامل بازتابنده‌های افقی در محیطی با تغییرات سرعت قائم (بدون تغییرات سرعت جانبی) است، مقادیر سرعتی که از رابطه دیکس (دیکس، ۱۹۵۵) محاسبه می‌شود، کافی خواهد بود. در محیط‌های با ناهمگنی جانبی، روش‌های

پارامترهای داده مشخص می‌شود. این پارامترها عبارت‌انداز: زمان سیر پرتو نرمال  $\tau_0 = t_0/2$ ، مشتق مکانی اول آن (مولفه افقی بردار کندی) که با  $P^{(\xi)}$  نشان داده می‌شود و مشتق مکانی دوم زمان سیر که با ماتریس  $M_{NIP}^{(\xi)}$  مشخص می‌شود. پارامترهای داده به صورت زیر نشان داده می‌شود (دوونک، ۲۰۰۴):

$$d_{obs} = (\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, P^{(\xi)}, \xi_0), \quad i = 1, 2, \dots, n_{daa}, \quad (1)$$

اگر  $V_0$  سرعت نزدیک به سطح زمین باشد، می‌توان این پارامترها را به طور مستقیم از محصولات برانبارش سطح بازتاب مشترک با استفاده از روابط زیر به دست آورد:

$$p = \frac{\sin(\alpha)}{v_0}, \quad M_N = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} \frac{1}{R_N}, \quad (2)$$

$$M_{NIP} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} \frac{1}{R_{NIP}},$$

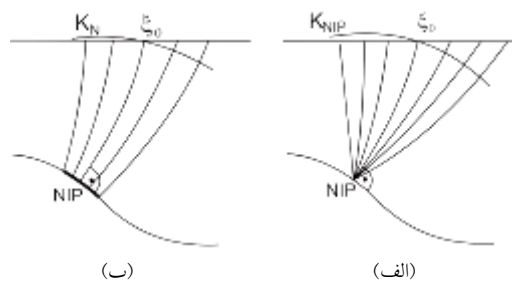
که  $\alpha$ ، زاویه ورود موج NIP نسبت به خط عمود بر سطح زمین و  $R_N$  و  $R_{NIP}$  به ترتیب، شعاع انحنای موج عمود و موج NIP هستند. این امر با انتخاب دستی نمونه‌های دورآفت صفر  $(t_0, x_0)$  روی رخدادهای بازتابی در مقاطع برانبارش یافته به روش سطح بازتاب مشترک، و استخراج عنصرهای  $P^{(\xi)}$  و  $M_{NIP}^{(\xi)}$  از آنها صورت می‌گیرد (شکل ۲). نقاط انتخاب دستی شده مستقل از یکدیگرند و نیازی به پیوسته بودن رخدادهای بازتابی در مقطع دورآفت صفر نیست. بنابراین می‌توان این نقاط را روی رخدادهایی که صرفاً به طور محلی هم‌دوس هستند، دستی انتخاب کرد.

و همکاران، ۱۹۹۶؛ فلچا و همکاران، ۲۰۰۴). در این حالت، مدل اولیه نقش مهمی خواهد داشت (روبین، ۲۰۰۳).

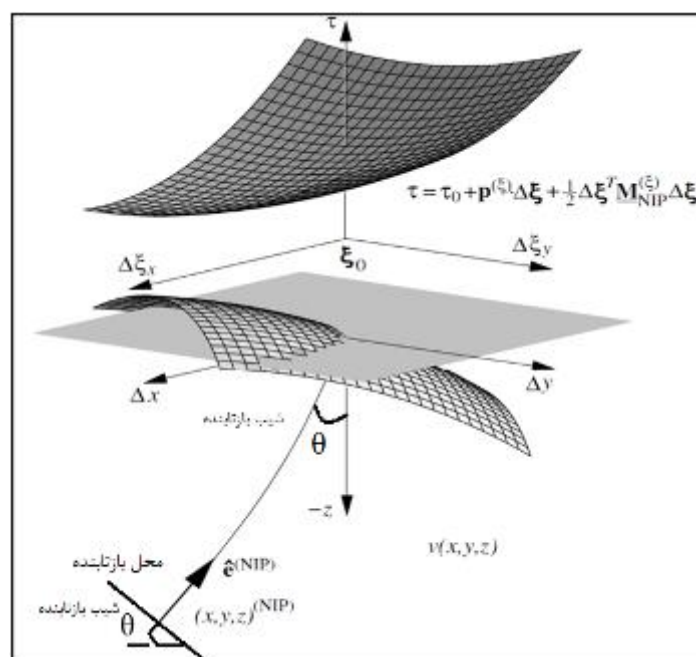
دوونک (۲۰۰۴) روشی برای تهیه مدل سرعت کوچک معرفی کرد که مشکلات روش توموگرافی را رفع می‌کند. در روش پیش‌گفته، اطلاعات زمان سیر به شکل مجموعه‌ای از نشانگرها به نام نشانگرهای جنبشی میدان موج از روی محصولات جانبی برانبارش سطح بازتاب مشترک انتخاب دستی می‌شود. این نشانگرها، پارامترهایی از دو نوع موج به نام موج نرمال (N) و موج نرمال در نقطه ورود (Normal Incidence Point, NIP) هستند (من، ۲۰۰۲). شکل‌های ۱-الف و ب، این دو نوع موج فرضی را نشان می‌دهد. از آنجاکه در این روش، انتخاب دستی رخدادهای بازتابی روی مقاطع پس از برانبارش صورت می‌گیرد، تعداد نقاط لازم برای توموگرافی کاهش چشمگیری می‌یابد. نکته مهم‌تر، دستچین کردن نقاط به صورت خودکار، در نقاطی است که در تحلیل هم‌دوسی دارای مقادیر زیادی هستند. در این روش، از خواص موج NIP برای توموگرافی استفاده می‌شود که بدین علت، آن را توموگرافی موج نرمال در نقطه ورود یا NIP توموگرافی گویند (دوونک، ۲۰۰۴).

## ۲ توموگرافی نشانگرهای جنبشی میدان موج

موج NIP مربوط به یک نمونه دورآفت صفر  $(t_0, x_0)$  که روی یک رخداد بازتابی مشخص شده است، با



شکل ۱. الف) جبهه موج NIP که در نقطه  $\xi_0$  آشکار شده است.  $K_{NIP}$  انحنای جبهه موج NIP است. ب) جبهه موج نرمال که در نقطه  $\xi_0$  آشکار شده و  $K_N$  انحنای جبهه موج نرمال است. این موج فرضی بر قطعه‌ای از بازتابنده حول نقطه‌ی NIP عمود است. (من، ۲۰۰۲).



شکل ۲. تعریف پارامترهای مدل و داده در NIP توموگرافی (دوونک، ۲۰۰۴).

وارون‌سازی به همراه نحوه پراکندگی سرعت تعیین می‌شوند. در حالت کلی سه بعدی، موج NIP در زیر سطح زمین با سه پارامتر مربوط به مکان آن و دو پارامتر که شیب محلی بازتابنده را در NIP نشان می‌دهند، مشخص می‌شود. این دو پارامتر را می‌توان به صورت دو مولفه یک بردار یکه عمود بر بازتابنده در NIP و یا به صورت دو زاویه نشان داد. نقاط واقع روی سطح برداشت را با بردار دو مولفه‌ای  $\xi$  نشان می‌دهیم. با این طرز نوشتار، کمیت‌هایی که یک NIP را در زیر سطح مشخص می‌کنند به صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$(x, y, z, e_x, e_y)^{(NIP)}, \quad (3)$$

که  $x^{(NIP)}$ ،  $y^{(NIP)}$  و  $z^{(NIP)}$  مختصات فضایی NIP و  $e_x^{(NIP)}$  و  $e_y^{(NIP)}$  مولفه‌های افقی بردار یکه  $\hat{e}_x^{(NIP)}$  هستند، که این بردار به طور محلی بر بازتابنده عمود است. باید در نظر داشت که  $z^{(NIP)} < 0$  است، چرا که تمام NIP در زیر سطح اندازه گیری قرار دارند (شکل ۲). مدل سرعت را می‌توان به کمک اسپلاین‌های دوگانه به صورت

در این دسته داده، چون  $\tau_0$  از روی یک سیگنال بازتابی با طول محدود روی داده لرزه‌ای تعیین شده، تحت تاثیر مقداری خطا قرار می‌گیرد. لذا ممکن است  $\tau_0 = t_0/2$  زمان سیر بازتابی دقیق و صحیح را نشان ندهد. ثابت در نظر گرفتن  $\tau_0$  و  $P^{(z)}$  به معنی چشم‌پوشی خطاهای اندازه گیری از این کمیت‌ها است که ممکن است منجر به ناپایداری فرایند وارون‌سازی شود. در یک مدل سرعت صحیح، همه پارامترهای داده مربوط به همه امواج NIP به درستی مدل‌سازی می‌شوند. درستی پارامترهای به دست آمده از مدل‌سازی مستقیم را با کمینه‌سازی اختلاف بین آنها و پارامترهای مشاهده‌ای بررسی می‌کنند. اختلاف پیش‌گفته باید به کمتر از یک حد مشخص برسد. هدف فرایند وارون‌سازی، یافتن چنین مدل بهینه‌ای است (فرا و ماداریاگا، ۱۹۸۸؛ بلو و ریدان، ۲۰۰۷). موقعیت فضایی NIP  $(x, z)$  و شیب محلی بازتابنده‌ها،  $\theta$ ، که جهت پرتو عمود بر بازتابنده در آن نقطه داده را تعیین می‌کند، در ابتدا ناشناخته‌اند. این کمیت‌ها را باید در حکم پارامترهای اضافی مدل در نظر گرفت که طی فرایند

زیر نوشت:

بازتاب مشترک به دست آورد (یاگر و همکاران، ۲۰۰۱). سپس یک مدل از ساختار زمین شناسی زیر سطحی که با پارامترهای زیر مشخص می شود، تعریف خواهد شد:

(۴)

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} \sum_{l=1}^{n_z} v_{jkl} \beta_j(x) \beta_k(y) \beta_l(-z),$$

که  $\beta_j(x)$ ،  $\beta_k(y)$  و  $\beta_l(-z)$  تابع های پایه ای اسپلاین های دو گانه از درجه  $m$  و  $v_{jkl}$  ضرایب اسپلاین های دو گانه می باشند. علامت منفی در این رابطه برای تاکید بر جهت مثبت  $z$  به سمت بالا است. در طی فرایند توموگرافی، در هر مرحله برای انجام مدل سازی مستقیم نیاز به کاربرد تکنیک دنبال کردن پرتو است، که شرط اعمال این روش وجود یک مدل سرعت تدریجی است. در این تحقیق، حالت دو بُعدی روش NIP توموگرافی مورد استفاده قرار می گیرد که برای انجام این امر، مدل سرعت باید تا مرتبه سوم مشتق پذیر و پیوسته باشد. از این رو اسپلاین های دو گانه درجه ۴ برای این حالت استفاده خواهد شد. در حالی که برای وارون سازی توموگرافی یک بُعدی، مدل سرعت با اسپلاین های دو گانه مکعبی ( $m=3$ ) تعریف می شوند. در نتیجه، برای حالت دو بُعدی می توان پارامترهای مدل را به صورت زیر نوشت (کلور، ۲۰۰۷):

$$m = \left[ [x, z, \theta_{NIP}]_{i=1}^N, [v_{i,j}]_{i,j=1,1}^{n_x, n_z} \right]. \quad (5)$$

گام ابتدایی در تهیه مدل سرعت بدین روش، مدل سازی مستقیم است. مسئله تخمین مدل سرعت صحیح، به شکل یک مسئله وارون حل می شود (تارانولا، ۱۹۸۲؛ بوزدا و همکاران، ۲۰۱۱). در ادامه با استفاده از پارامترهای داده و مدل، می توان مسئله وارون را فرمول بندی کرد که برای حالت کلی سه بعدی و با در دست داشتن تعداد  $n_{data}$  نقطه داده به صورت زیر است (دوونک و هوبرال، ۲۰۰۲):

$$\left( \tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{obs}, \quad i=1, 2, \dots, n_{data}, \quad (6)$$

این پارامترها را می توان از نتایج روش برانبارش سطح

آنگاه، با استفاده از مدل سازی مستقیم، سعی می شود پارامترهای مشاهده ای را از مدل جاری به دست آورد. پارامترهای مدل سازی شده به صورت زیر نشان داده می شود:

$$\left( \tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{mod} \quad i=1, 2, \dots, n_{data} \quad (8)$$

در مرحله بعد، لازم است که تفاوت میان این پارامترها و پارامترهای مشاهده ای (۶) کمینه شوند. هدف از کمینه سازی این تفاوت، بهبود پارامترهای مدل است. در یک مدل سرعت بهینه، تفاوت میان پارامترهای مدل سازی شده (۸) و پارامترهای مشاهده ای (۶) به کمتر از یک حد مشخص می رسند. این حد توسط نسبت سیگنال به نوفه در داده های لرزه ای، الگوریتم مورد استفاده برای حل مسئله وارون و سایر محدودیت ها که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، کنترل می شود. در صورتی که پارامترهای مشاهده ای (۶) و پارامترهای مدل (۷)، به ترتیب به صورت بردار داده  $d$  و بردار مدل  $m$  بازنویسی شوند، مسئله وارون تعیین شده در بخش قبلی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

طی فرایند وارون سازی یک بردار مدل  $m$  تعیین می شود، به طوری که اختلاف بین پارامترهای مشاهده ای و داده های مدل سازی شده،  $d_{mod} = f(m)$ ، را به یک مقدار کمینه برساند. عملگر غیرخطی  $f$  معرف مدل سازی مستقیم با تکنیک دنبال کردن پرتو، به منظور به دست آوردن مقادیر (۸) است. در روش NIP توموگرافی، برای اندازه گیری میزان اختلاف بین

مدل سرعت اولیه به شکل عنصرهای ماتریس  $m^{(v)}$  و ضرایب وزنی داده‌ها به شکل عنصرهای قطری ماتریس  $C_D$  و محدودیت‌های اضافی باید مشخص شود. برای هر نقطه داده، یک پرتو به سمت عمق دنبال می‌شود، تا زمانی که زمان سیر مربوط به آن نقطه داده به‌طور کامل مصرف شود. نقطه شروع هر پرتو در سطح زمین ( $Z=0$ ) و جهت اولیه آن با پارامترهای مربوط به آن تعیین می‌شود. بردار کنندی پرتو در NIP، نشان دهنده بردار نرمال بر بازتابنده در NIP است. با این اطلاعات، می‌توان بردار مدل اولیه NIP، یعنی  $m^{(NIP)}$  را تشکیل داد. مدل‌سازی مستقیم با استفاده از روش دنبال کردن پرتو در جهت بالاسو صورت می‌گیرد. هدف از این کار، به‌دست آوردن عنصرهای ماتریس  $d_{mod}$  است و به‌طور هم‌زمان عنصرهای ماتریس  $F$  (مشتقات فرشه) محاسبه می‌شود (ژائو و شیرووت a,b ۲۰۱۱). تابع هزینه از محاسبه اختلاف  $d$  و  $d_{mod}$  به‌دست می‌آید:

$$S(m) = \frac{1}{2} \Delta d^T(m) C_D^{-1} \Delta d(m) + \frac{1}{2} \varepsilon^T m^{(v)} D m^{(v)}. \quad (10)$$

عبارت فوق یک عبارت مطلقاً مثبت است. بنابراین عبارت منظم‌کننده را می‌توان به‌صورت مجذور میانگین بردار مدل سرعت  $m^{(v)}$ ، که در یک عامل  $\varepsilon$  ضرب شده است، تعبیر کرد. این فاکتور وزندهی، مشارکت نسبی عبارت خطای داده و عبارت منظم‌کننده در تابع هزینه را متعادل می‌کند. سپس دستگاه معادله‌های خطی  $\hat{F} \Delta m = \Delta \hat{d}$  تشکیل شده و ( $\Delta m$ ) (بردار به‌روزرسانی مدل) از حل آن به روش کمترین مربعات به‌دست می‌آید. بردار  $\Delta m$  در یک ضریب  $\lambda < 1$  ضرب شده و به مدل جاری اضافه می‌شود. سپس، مجدداً مدل‌سازی مستقیم (با استفاده از روش دنبال کردن پرتو) روی این مدل به‌روز شده صورت می‌گیرد و پارامترهای داده جدیدی را به

پارامترهای مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده از نرْم حداقل مربعات یا نرْم  $L_2$  وزن‌دهی شده (تارانتولا، ۲۰۰۵) استفاده می‌شود که به‌صورت معادله زیر فرموله شده و مدل بهینه، با کمینه‌سازی اختلاف پیش‌گفته به‌دست می‌آید:

$$S(m) = \frac{1}{2} \|d - f(m)\|_D^2 = \frac{1}{2} \|\Delta d(m)\|_D^2 \quad (9) \\ = \frac{1}{2} \Delta d^T(m) C_D^{-1} \Delta d(m),$$

که  $\Delta d(m) = d - f(m)$  یک ماتریس متقارن مثبت است که عنصرهای آن ضرایب وزنی پارامترهای مختلف داده در هنگام محاسبه  $S$  می‌باشند. ماتریس  $C_D$  در حکم ماتریس کوواریانس داده تعبیر می‌شود (تارانتولا، ۱۹۸۷). عنصرهای قطری آن  $(C_D)_{ii} = \sigma_i^2$  واریانس پارامترهای مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. داده‌های موجود، برای تعیین جواب یکتا برای همه پارامترهای مدل، کافی نیست؛ بدین معنی که تعداد پارامترهایی که مدل را تعریف می‌کنند، بیشتر از تعداد پارامترهایی است که داده‌های مشاهده‌ای را تعریف می‌کنند. به چنین مسئله‌هایی، معادله‌های بدوضع گفته می‌شود. به‌منظور برطرف کردن این مشکل، محدودیت‌ها و شرایط مرزی متفاوتی روی مدل اعمال می‌شود. از روش‌های معمول در وارد کردن محدودیت به مدل، شرط دارا بودن کمینه برای بردار مدل یا بردار به‌روزرسانی مدل است (تارانتولا، ۱۹۸۷؛ چیاو و همکاران، ۲۰۱۰). این امر با اضافه کردن یک عبارت اضافی به تابع هزینه صورت می‌گیرد. این عبارت اضافی شامل مجذور نرْم  $L_2$  بردار مدل ضرب در یک فاکتور میراکننده است. افزودن این عبارت اضافی به تابع هزینه، فاکتور میراکننده پیش‌گفته را به همه عنصرهای قطری ماتریس  $F_T D_D^{-1} F$  اضافه و وارون-پذیری این ماتریس را تضمین می‌کند (چرونی، ۲۰۰۱).

### ۳ الگوریتم وارون‌سازی NIP توموگرافی

در گام ابتدایی الگوریتم وارون‌سازی NIP توموگرافی،

$V(z)$ ، نیز با استفاده از ضرایب اسپلاین دوگانه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v(z) = \sum_{k=1}^{n_z} v_k \beta_k(-z). \quad (13)$$

که  $\beta_k(-z)$  تابع اسپلاین دوگانه از درجه  $m=3$  (اسپلاین دوگانه مکعبی) است. علامت منفی برای بیان این حقیقت که جهت مثبت  $Z$  به سمت بالا است، در رابطه فوق منظور شده است. پارامترهای مدل که باید طی فرایند وارون‌سازی تعیین شوند عبارت‌اند از:

$$z_i^{(NIP)}, i = 1, 2, 3, \dots, n_{data} \quad (14)$$

$$v_k, k = 1, 2, 3, \dots, n_z.$$

لذا، تعداد کل پارامترهای داده برابر  $2 \times n_{data}$  و تعداد کل پارامترهای مدل برابر  $n_{data} + n_z$  است.

### ۳-۱ پارامترهای موثر بر NIP توموگرافی

همان‌گونه که عنوان شد، روش NIP توموگرافی از اطلاعات زمان‌سیر مرتبه دوم به‌منظور تهیه مدل سرعت استفاده می‌کند. این اطلاعات به‌منظور تصویرسازی عمقی حتی برای محیط‌های دارای ناهمگنی جانبی، کافی است. البته تجربه نشان داده است که این فرض در حضور تغییرات خیلی شدید جانبی سرعت معتبر نخواهد بود. استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان‌سیر در توصیف رخدادهای بازتابی، به‌طور چشم‌گیری موجب ساده‌تر شدن فرایند استخراج نشانگرهای جنبشی میدان موج از داده پیش از برانبارش می‌شود. خودکار بودن فرایند استخراج نقاط یا انتخاب دستی کردن آنها، از بزرگ‌ترین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های توموگرافی است. باین‌حال، استفاده و اعمال بیش از حد تقریب‌ها روی پدیده‌های واقعی، منجر به محدودیت کاربرد این روش می‌شود. بنابراین لازم است یک محدوده اعتبار برای استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان‌سیر تعریف کرد و

وجود می‌آورد. سپس تابع هزینه از راه محاسبه اختلاف  $d$  و  $d_{mod}$  جدید، محاسبه می‌شود. چنانچه تابع هزینه افزایش یابد، مدل به‌روز شده رد می‌شود و مقدار  $\lambda$  کاهش می‌یابد. سپس مراحل قبل تا زمانی که تابع هزینه کاهش یابد و یا اینکه مقدار  $\lambda$  کمتر از یک حد مشخص شود، تکرار می‌شود. اگر تابع هزینه کاهش نیافت (حتی برای مقادیر کوچک  $\lambda$ )، نتیجه می‌شود که یک مقدار کمینه برای تابع هزینه به‌دست آمده است. اگر تابع هزینه کاهش یافت، مدل به‌روز شده قبول می‌شود و ضرایب وزنی برای منظم کردن مدل،  $\epsilon$ ، کاهش می‌یابد و تکرار بعدی روی مدل جدید، با برگشتن به مرحله محاسبه تابع هزینه، شروع می‌شود. روند توموگرافی، زمانی که به حداکثر تعداد تکرار برسد و یا اینکه مقدار تابع هزینه کمتر از یک حد مشخص شود، قطع می‌شود (سن و استوفا، ۱۹۹۵؛ تیب و همکاران، ۲۰۱۰). اگر توزیع سرعت در زیر سطح به‌طور جانبی ثابت باشد و بازتابنده‌ها را افقی در نظر بگیریم، مسئله تعیین سرعت در زیر سطح زمین به‌طور قابل توجهی ساده‌سازی می‌شود. برای تهیه مدل سرعت در این حالت کافی است رابطه وارون‌سازی دیکس (۱۹۵۵) را به کار برد. در حالت یک‌بُعدی، هر موج NIP را می‌توان با دو پارامتر تعریف کرد. در واقع در حالت یک‌بُعدی، هر نقطه داده شامل دو پارامتر است. لذا، تعداد نقاط ورودی برای انجام فرایند وارون‌سازی  $2 \times n_{data}$  است:

$$\left( \tau_0, M_{NIP}, P^{(\xi)} \right)_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_{data} \quad (11)$$

بنابراین می‌توان از یک برداشت نقطه میانی مشترک رابطه زیر را استخراج کرد:

$$t^2 = t_0^2 + 2t_0 M_{NIP} h^2, \quad (12)$$

محل یک NIP در زیر سطح زمین مربوط به یک نقطه داده به‌طور کامل با عمق آن نقطه یا با مؤلفه قائم آن،  $Z_{NIP} < 0$  مشخص می‌شود. تابع سرعت یک‌بُعدی،



داده از محصولات برانبارش CRS، ابتدا آزمون بازه CRS روی داده لرزه‌ای واقعی عملی شد و سپس با مطمئن‌ترین بازه، برانبارش صورت گرفت.

### ۲-۳ اصلاح یا نرم کردن نشانگرها

در فرایند برانبارش CRS، نشانگرهای میدان موج برای هر نمونه دورأفت صفر به‌طور جداگانه تعیین می‌شود. اگرچه این امر سبب ایجاد مزایای متعددی مانند به‌دست آمدن نشانگرهای با کیفیت زیاد و رفع مشکل کشیدگی سیگنال‌ها می‌شود، با این حال از آنجاکه این نقاط مستقل از یکدیگر هستند، امکان ایجاد نوسانات غیرفیزیکی در نشانگرهای جنبشی میدان موج در طول رخداد بازتابی دور از انتظار نخواهد بود. این نوسانات با استفاده از الگوریتم عرضه شده دوونک (۲۰۰۴) برطرف خواهد شد. همچنین با اصلاح نشانگرها با الگوریتم پیش‌گفته، می‌توان نقاطی را که روی رخدادهای غیر واقعی یا رخدادهای چندگانه قرار گرفته‌اند، حذف کرد. حذف این نقاط باعث اطمینان بیشتر از پایداری فرایند وارون‌سازی توموگرافی می‌شود.

همچنین در فرایند انتخاب دستی خودکار نشانگرها، محدودیت‌هایی روی مقادیر نشانگرهای جنبشی اعمال شده تا از ورود آن دسته از نشانگرهایی که دارای مقادیری بیشتر یا کمتر از یک حد آستانه‌ای هستند، به مرحله وارون‌سازی جلوگیری شود. فاصله مکانی و زمانی نقاط انتخاب دستی شده به نحوه پارامتری کردن مدل سرعت یعنی به فاصله افقی و قائم گره‌های اسپلاین دوگانه بستگی دارد. در جهت افقی باید حداقل دو نقطه روی رخداد بازتابی در فاصله بین دو گره متوالی وجود داشته باشد. بدین ترتیب می‌توان این امر را به‌صورت یک قانون کلی بیان کرد که در آن لازم است تعداد نقاط داده‌ها از تعداد پارامترهای مدل بیشتر باشد. در غیر این حالت، ضرایب وزنی مورد استفاده به‌منظور منظم‌سازی فرایند وارون‌سازی، باید طی هر تکرار افزایش یافته که موجب

این امر در هنگام استفاده از روش برانبارش CRS، برای به‌دست آوردن نشانگرهای قابل‌اعتماد، در نظر گرفته خواهد شد. همچنین فرایند انتخاب دستی نقاط در همه روش‌های توموگرافی، عامل ایجاد خطا در فرایند وارون‌سازی توموگرافی است.

از عوامل گوناگونی که روی دقت و کیفیت نشانگرهای لازم در اجرای فرایند NIP توموگرافی تاثیر خواهد داشت، می‌توان به پارامترهایی مانند طول نیم‌رخ لرزه‌ای (بازه دورأفت و نقطه میانی)، تعداد ردلرزه به‌ازای هر CMP، طول پنجره زمانی تحلیل همدوسی، آهنگ نمونه‌برداری از سرعت، نحوه محاسبه همدوسی و انحراف رخدادهای بازتابی از حالت هذلولی اشاره کرد. از عوامل پیش‌گفته، انحراف رخدادهای بازتابی از حالت هذلولی به منزله مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار شناخته می‌شود. در صورتی که مقدار این انحراف بزرگ باشد، که نشان‌دهنده پیچیدگی هندسی بسیار زیاد ساختارهای زیرسطحی است، تعیین دقیق نشانگرهای میدان موج غیرممکن خواهد بود. بنابراین، نتایج وارون‌سازی توموگرافی براساس این نشانگرها دور از واقعیت است. به‌منظور بررسی این مشکل در یک داده لرزه‌ای، کافی است تعدادی از CMPها انتخاب و بررسی شود که رخدادهای بازتابی حداکثر تا چه دورأفتی تقریباً به شکل هذلولی حضور دارند. بررسی‌های تجربی نشان داده است که در صورتی که عمق هدف ۳ تا ۴ کیلومتر در نظر گرفته شده باشد، انتخاب حداکثر دورأفت بین ۲-۲/۵ کیلومتر، به‌منظور معتبر بودن فرض هذلولی مناسب است (من و همکاران، ۱۹۹۹). دوونک (۲۰۰۴) پایداری روش NIP توموگرافی نسبت به دقت پارامترهای گوناگون درگیر در اجرای فرایند NIP توموگرافی را مورد بررسی قرار داد. بر این اساس، دقت مدل سرعت نهایی به‌شدت به پارامتر بازه CRS وابسته است. بنابراین در این تحقیق، به‌منظور فراهم کردن قابل‌اعتمادترین شرایط برای انتخاب دستی نقاط

که این مقادیر باعث کاهش پایداری فرایند وارون‌سازی می‌شود. مقادیر بالای  $M_{NIP}^{(x)}$  مربوط به رخدادهای بازتابی کم‌عمق (زمان‌سیرهای کم) است. مسئله مهم در وارون‌سازی توموگرافی، حذف نقاط داده مربوط به بازتاب‌های چندگانه است. در صورتی که ساختار زمین‌شناسی زیرسطحی نسبتاً ساده باشد، این نقاط داده را می‌توان به روشی مشابه با روش تحلیل سرعت مرسوم شناسایی کرد.  $M_{NIP}^{(x)}$  با رابطه زیر به سرعت برون‌راند نرمال  $V_{NMO}$  مرتبط می‌شود:

$$M_{NIP}^{(x)} = \frac{2}{t V_{NMO}^2}. \quad (15)$$

از آنجا که بازتاب‌های چندگانه دارای سرعت‌هایی کمتر از (یا مساوی با) بازتاب اصلی هستند، بنابراین  $M_{NIP}^{(x)}$  مربوط به چندگانه‌ها بیشتر از مقادیر مربوط به بازتاب اصلی خواهد بود. چنانچه مقادیر  $M_{NIP}^{(x)}$  در برابر زمان‌سیر یک‌طرفه  $\tau_0 = t_0/2$  رسم شوند (شکل ۳-الف) نقاط داده مربوط به بازتاب‌های چندگانه در بالا و تقریباً موازی روند عمومی نقاط قرار می‌گیرند که به سادگی می‌توان آنها را حذف کرد (شکل ۳-ب).

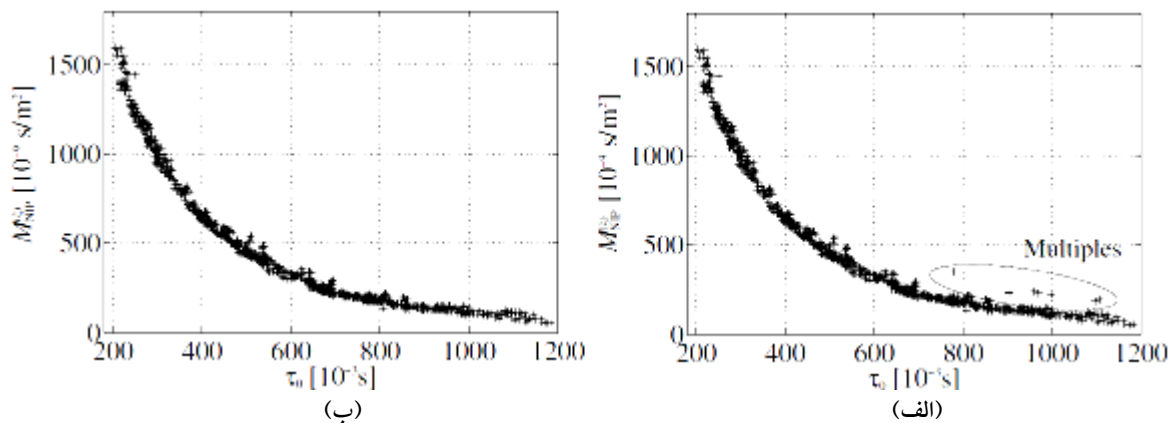
مقدار نشانگر  $R_{NIP}$  در بازتاب‌های چندگانه مربوط به یک بازتاب اولیه همواره کمتر یا مساوی مقدار  $R_{NIP}$  آن بازتاب اولیه است. از این اصل می‌توان برای حذف بازتاب‌های چندگانه از مقطع برابارش یافته به روش CRS استفاده کرد. در این تحقیق، به‌جای حذف چندگانه‌ها، سعی می‌شود که این بازتاب‌های چندگانه مورد برداشت و انتخاب دستی قرار نگیرند. در این تحقیق، با وارد کردن یک شرط به برنامه رایانه‌ای انتخاب دستی

به‌وجود آمدن یک مدل سرعت تدریجی غیرواقعی می‌شود. از طرف دیگر، هرچه تعداد نقاط داده بیشتر باشد، پایداری فرایند وارون‌سازی بهبود یافته و در کنار آن، زمان محاسبه به‌صورت خطی افزایش خواهد یافت. در جهت محور زمان، حداقل فاصله بین نقاط انتخاب دستی شده، باید از طول سیگنال مربوط به یک رخداد بازتابی بیشتر باشد. در این صورت اطمینان حاصل می‌شود که دو نقطه انتخاب دستی شده در یک مکان مشخص، در حقیقت مربوط به رخدادهای بازتابی مجزایی هستند.

### ۳-۳ اصلاح نقاط انتخاب دستی شده

پس از اجرای فرایند انتخاب دستی کردن نقاط و استخراج نشانگرهای گوناگون میدان موج از مقاطع نشانگرهای CRS، نقاط حاصل مورد بازبینی قرار می‌گیرد و صحت و دقت آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت نیاز، اصلاح می‌شوند. در این مرحله، داده‌های غیر قابل اعتماد و همچنین نقاطی که مربوط به بازتاب‌های چندگانه می‌شوند، شناسایی و حذف می‌شوند. داده‌های غیرقابل اعتماد را می‌توان با رسم پارامترهای گوناگون داده در برابر مختصات مکانی آنها شناسایی کرد. به‌لحاظ نظری، نشانگرهای جنبشی میدان موج باید به نرمی در طول رخداد بازتابی تغییر کنند. بنابراین، پارامترهای داده مربوط به نقاطی که روی یک رخداد بازتابی مشترک واقع‌اند، الزاماً باید پیوستگی مشخصی از خود نشان دهند. شکل ۳ چگونگی اصلاح نقاط انتخاب دستی شده در مورد یک داده واقعی را نشان می‌دهد.

در مجموع، نقاط داده با مقادیر  $M_{NIP}^{(x)}$  بسیار زیاد (بیشتر از  $2000 \times 10^{-9} S / m^2$ ) باید حذف شوند، چرا



شکل ۳. الف) مشخص کردن چندگانه‌ها در نمودار و ب) حذف آنها با استفاده از سرعت کمتر چندگانه‌ها در برابر بازتابنده‌های واقعی (دونک، ۲۰۰۴).

دلیل عملی وجود ندارد که فاصله افقی گره‌ها متغیر در نظر گرفته شود (دونک، ۲۰۰۴). با این حال، در جهت قائم، فاصله بین گره‌های اسپلاین دوگانه را می‌توان متغیر در نظر گرفت. در بیشتر شرایط، قسمت‌های کم عمق محدوده اکتشافی شامل رخداد‌های بازتابی فراوانی می‌شود، در حالی که رخداد‌های بازتابی محدودی در زمان‌سیرهای زیاد قابل مشاهده هستند. بنابراین، برای قسمت‌های کم عمق، فاصله بین گره‌ها در جهت قائم کمتر از نواحی عمیق‌تر در نظر گرفته می‌شود. در مجموع، فاصله قائم بین گره‌ها بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر معقول است.

#### ۴ تهیه مدل سرعت در داده مصنوعی یک بُعدی

در ادامه به منظور وارون‌سازی توموگرافی یک بُعدی و ارزیابی عملکرد آن، این روش روی یک داده لرزه‌ای مصنوعی اعمال می‌شود. برای این منظور یک مدل شامل چهارده لایه که میزان سرعت در هر لایه ثابت است، تعریف می‌شود. شکل ۴-ب، یک برداشت نقطه میانی مشترک که با استفاده از مدل شکل ۴-الف به دست آمده است را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی، از موجک ریکر با فاز صفر و بسامد ۳۰ هرتز و فاصله نمونه‌برداری دو میلی‌ثانیه استفاده شده است. سپس نوبه به رد لرزه‌های حاصل اضافه می‌شود. برای هر نمونه دورآفت صفر،

نقاط داده، حالتی به وجود آمده است که صرفاً بازتابنده‌هایی که مقدار نشانگر  $R_{NIP}$  آنها از مقادیر بازتابنده‌های فوقانی بیشتر باشد، مورد برداشت قرار گیرند.

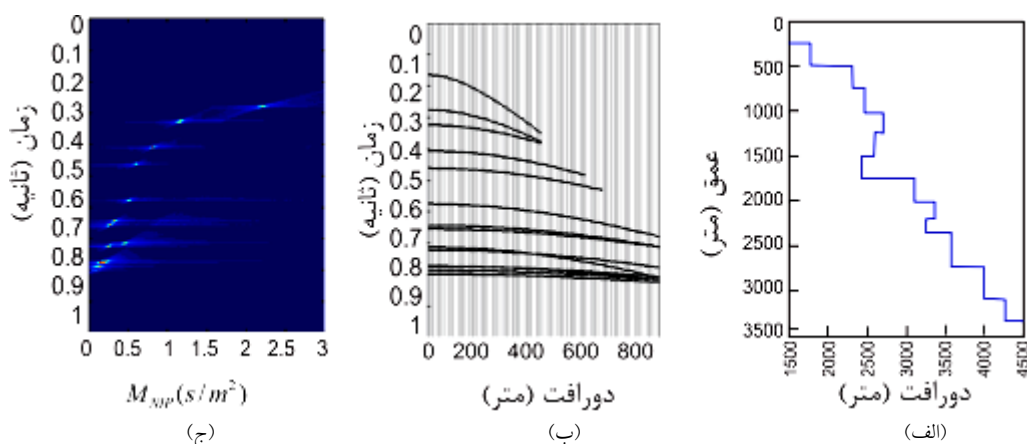
#### ۳-۴ اعمال محدودیت روی پارامترهای مدل

قبل از شروع فرایند وارون‌سازی توموگرافی، لازم است که مدل سرعت اولیه‌ای تعریف شود. این امر شامل انتخاب مناسب سری گره‌های اسپلاین دوگانه در جهت‌های افقی و چندگانه و مشخص کردن مدل سرعت اولیه است. انتخاب مناسب فاصله افقی و قائم بین گره‌های اسپلاین دوگانه به میزان پیچیدگی ساختار سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در زیر زمین بستگی دارد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، این فرض که مقادیر  $M_{NIP}^{(x)}$  که از داده لرزه‌ای به روش برانبارش CRS به دست آمده را می‌توان با مقادیر مدل‌سازی شده به روش دنبال کردن دینامیکی پرتو مرتبط دانست، مستلزم تهیه مدل سرعت با نرمی مشخص در جهت افقی است. بررسی‌های گوناگون نشان داد، به منظور اهداف اکتشافی با اعماق ۲ تا ۴ کیلومتر، چنانچه بازه دورآفت ۲ کیلومتر یا بیشتر برای برانبارش CRS استفاده شود، فاصله اسپلاین‌های دوگانه افقی باید حداقل ۵۰۰ متر باشد. اگرچه، الزامی در ثابت بودن فاصله بین گره‌های اسپلاین دوگانه وجود ندارد، با این حال هیچ

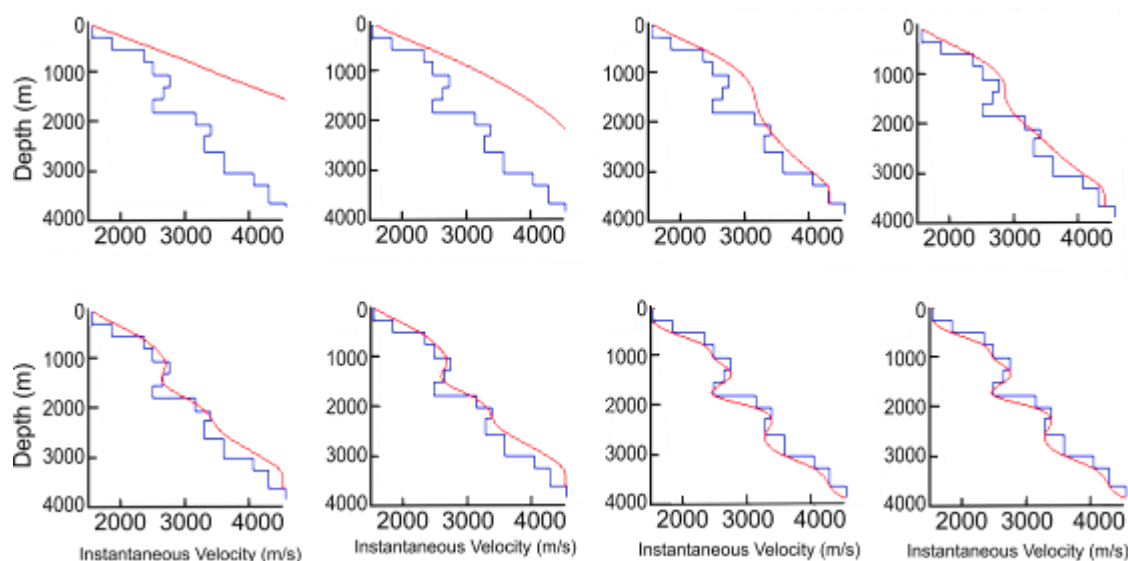
پارامترهای انتخاب دستی شده داده‌های  $(\tau_0, M_{NIP})$  را پس از ۱۲ بار تکرار، نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که خطایی در حدود  $10^{-9} S/m^2$  برای  $M_{NIP}$  متناظر با خطای زمان سیر  $10^{-3}$  ثانیه در دورافت ۲۰۰۰ متر، پس از ۱۲ بار تکرار در داده‌ها به وجود می‌آید، که این مقدار خطا قابل چشم‌پوشی است. در این مورد مرز مشخصی به منظور قابل قبول بودن با نبودن این مقادیر خطا وجود ندارد. باین حال پراکندگی خطا در اطراف نقطه صفر برای دو پارامتر  $(\tau_0, M_{NIP})$  و کوچک بودن خطا در عمق‌های کم، برای این منظور کافی خواهد بود. همان‌گونه که در شکل ۴-الف دیده می‌شود، این مقدار خطا برای عمق‌های کم، صفر تا دو متر و در عمق‌های بالاتر، تا پنج متر نشان داده شده که کاملاً قابل قبول است. برای مشاهده همگرایی مدل سرعت طی فرایند وارون‌سازی، مقدار تابع هزینه  $S$  به صورت تابعی از شماره تکرار در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این نمودار نشان داده می‌شود که پس از ۹ تکرار، تابع به مقدار قابل قبولی کاهش پیدا کرده است.

پس از به دست آوردن سرعت در مدل مصنوعی

پارامترهای داده  $(\tau_0, M_{NIP})$  از راه تحلیل شباهت در برداشت CMP با استفاده از رابطه زمان‌سیر در نرم‌افزار مت‌کب محاسبه شد. پس از اعمال تحلیل شباهت، سیزده نقطه انتخاب دستی می‌شود که در شکل ۴-ج نشان داده شده است. در این مثال، مدلی که باید طی فرایند وارون‌سازی تعیین شود، با پانزده ضریب اسپلین دوگانه در محل گره‌هایی با فاصله قائم ۲۰۰ متر تعریف می‌شود. بنابراین بردار مدل شامل ۲۸ عنصر و بردار داده شامل ۲۶ عنصر است. برای مدل اولیه، سرعت نزدیک سطح ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و گرادیان سرعت  $2 s^{-1}$  استفاده شده است. نتایج وارون‌سازی در هر تکرار در شکل ۵ به نمایش در آمده است. مدل سرعت تدریجی نهایی پس از ۱۲ تکرار حاصل می‌شود که خیلی نزدیک به مدل واقعی است. خطای بازسازی تعیین عمق بازتابنده پس از ۱۲ تکرار، کمتر از ۷ متر است (شکل ۶-الف). با استفاده از این نتایج، استفاده از مدل سرعت فوق قابل قبول است. واضح است چنین مدلی این امکان را فراهم می‌کند که عمق بازتابنده را به طور قابل اعتماد تعیین کرد. این فرایند حتی در صورت توزیع ناپیوسته و پیچیده سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در زیر سطح نیز امکان‌پذیر است. شکل‌های ۶-ب و ۶-ج خطای باقی‌مانده بین پارامترهای مدل‌سازی شده و



شکل ۴. مثال داده مصنوعی یک‌بعدی. (الف) ساختار سرعت لایه‌ای یک‌بعدی (ب) برداشت CMP مصنوعی که با دنبال کردن پرتو در مدل سرعت (الف) مدل‌سازی شده است. (ج) داده‌های ورودی وارون‌سازی توموگرافی که از برداشت CMP استخراج شده است.



شکل ۵. مثال داده مصنوعی یک‌بُعدی. همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه. از بالا-چپ به پایین-راست: مدل سرعت پس از صفر (مدل اولیه)، ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تکرار (خط منحنی). برای مقایسه، مدل سرعت لایه‌ای واقعی نیز رسم شده است (خطوط شکسته).

سرعت در داده بدون نوفه ندارند. با افزایش تعداد تکرارها، احتمال به تله افتادن الگوریتم در بیشینه‌ها یا کمینه‌های محلی در حضور نوفه وجود دارد. در این روش نیز این مسئله باعث فقدان دقت در دستیابی به جواب بهینه نهایی خواهد شد. بدین علت همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، تعیین دقیق مقدار سرعت در نقاطی که تغییرات قائم سرعت شدید است، به درستی صورت نمی‌گیرد. البته این تغییر سرعت بسیار چشمگیر نیست؛ چرا که خطای تعیین مقدار سرعت و پارامترهای توموگرافی در داده مصنوعی با سطح نوفه ۲۰ دسی‌بل، همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، برای  $\Delta M_{NIP}$  در محدوده بین  $\pm 0.3 \times 10^{-9} (S/m^2)$  و میانگین آن نزدیک صفر است. برای مقدار  $\Delta \tau_0$  نیز مقدار خطا بین  $\pm 0.2 \times 10^{-3} (s)$  است که در محدوده قابل قبول قرار دارد و میانگین آن نیز نزدیک صفر است. تنها تاثیر وجود نوفه در تعیین مقدار سرعت، تبدیل به عمق داده‌ها و تعیین عمق هر لایه است که در این داده، بزرگ‌ترین خطا نزدیک ۱۲ متر در عمق‌های بالای ۳۰۰۰ متر است. در ادامه سطح نوفه به ۳۰ دسی‌بل افزایش پیدا کرد. نمودارهای تعیین مدل سرعت،

یک‌بُعدی به روش NIP توموگرافی، در این بخش تاثیر نوفه بر این روش بررسی می‌شود.

اساساً می‌توان عنوان کرد که روش‌های توموگرافی که در آنها نقاط داده به شکل خودکار و یا دستی، دستچین می‌شوند، دو مسئله پراکندگی نقاط انتخاب شده و سطح نوفه بسیار اهمیت خواهند داشت. تاثیر پراکندگی نقاط داده در دقت مدل نهایی، در داده‌های دو‌بُعدی بررسی خواهد شد. در این بخش به منظور تاثیر سطح نوفه، داده مصنوعی یک‌بُعدی که در بخش قبل مورد استفاده قرار گرفت، به نوفه با سطح ۲۰ دسی‌بل آغشته شد. شکل ۸، ساختار سرعت لایه‌ای یک‌بُعدی به همراه برداشت CMP مصنوعی را که با دنبال کردن پرتو در مدل سرعت مدل‌سازی شده به دست آمده و به آن نوفه با توزیع گاوسی اضافه شده است نشان می‌دهد. همچنین در این شکل داده‌های ورودی و خروجی واریانس توموگرافی که از برداشت CMP استخراج شده، آورده شده است. نتایج حاصل از روش NIP توموگرافی روی این داده، در شکل ۹ آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در تکرارهای اولیه، مدل‌های سرعت به دست آمده تفاوتی با مدل‌های

دوم مربوط به جبهه موج NIP در صفحه قائم را تعریف می‌کنند عبارت‌انداز زمان‌سیر پرتو نرمال  $\tau_0 = t_0/2$  و مشتقات اول و دوم زمان‌سیر یعنی  $p$  و  $M$  در نقطه  $x_0$  تعداد کل پارامترهای داده  $5n_{data}$  و پارامترهای مدل  $(3n_{data} + n_x n_z)$  است. معرفی اطلاعات سرعت اولیه در محل  $n_{data}$ ، در مدل باعث به‌وجود آمدن نقطه داده‌های اضافی می‌شود:

$$v(x_i, z_i) \quad i=1, \dots, n_{data} \quad (16)$$

این محدودیت که ساختار سرعت باید به‌طور محلی از ساختار بازتابنده در محل NIP تبعیت کند، موجب به‌وجود آمدن  $n_{data}$  نقطه داده می‌شود.

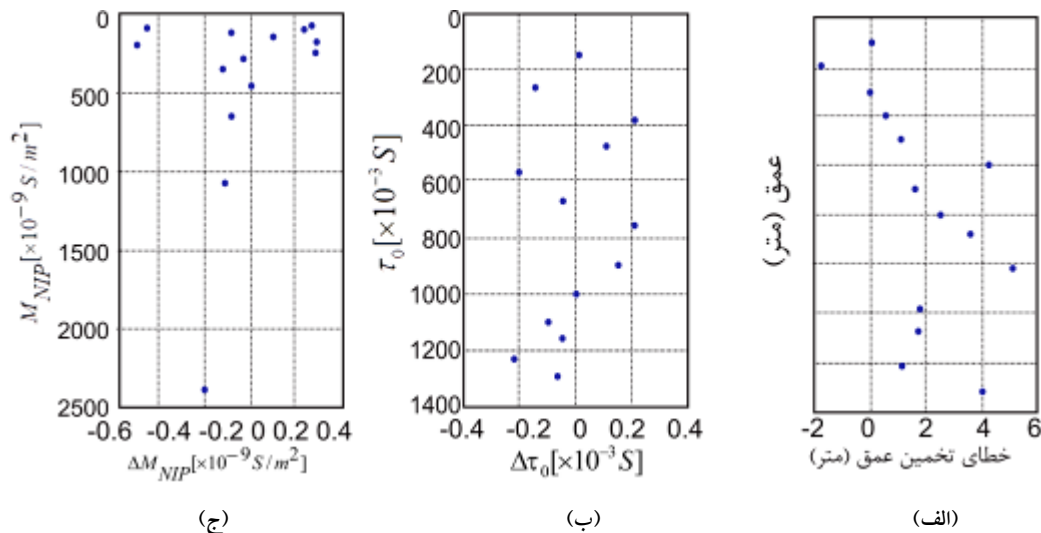
$$\left| \nabla_q v \right|_{(x,z)_i^{NIP}} = 0 \quad i=1, \dots, n_{data} \quad (17)$$

که  $\left| \nabla_q v \right|$  مقدار گرادیان سرعت را در طول بازتابنده، در اطراف یک NIP با موقعیت  $(x, z)$  نشان می‌دهد. با به حساب آوردن این محدودیت‌ها، تعداد کل پارامترهای داده برابر  $5n_{data} + n_{data}$  و تعداد پارامترهای مدل  $3n_{data} + n_x n_z$  خواهد شد.

به همراه مقدار خطای پارامترهای NIP توموگرافی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مقدار سرعت در عمق‌های بیشتر با دقت کمتری برآورد می‌شود. با این حال مقادیر خطای پارامترهای توموگرافی، اگرچه نسبت به سطح ۲۰ دسی‌بل افزایش نشان می‌دهد، همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارند. به‌منظور بررسی کارایی روش، داده مصنوعی تولید شده به روش توموگرافی معمول نیز مورد پردازش قرار گرفت. شکل ۱۲، نتیجه تهیه مدل سرعت به این روش و همچنین نتیجه این روش روی داده با سطح نوفه ۲۰ دسی‌بل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده‌شود، تفاوت قابل توجهی بین نتایج این دو روش دیده نمی‌شود.

#### ۵ تهیه مدل سرعت در داده مصنوعی دوبعدی

در حالت دوبعدی فرض می‌شود که ساختارهای زیرسطحی و میزان سرعت به‌طور جانبی نیز دارای تغییرات باشند. اطلاعات جنبشی برای تعیین مدل سرعت را می‌توان از داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک تعیین کرد. پارامترهایی که زمان‌سیر مرتبه



شکل ۶. مثال داده مصنوعی. (الف) اختلاف بین عمق بازتابنده در مدل واقعی و مقادیر مدل‌سازی شده طی توموگرافی. (ب) خطای باقی‌مانده در پارامتر  $\tau_0$  پس از ۱۲ تکرار. (ج) خطای باقی‌مانده در  $M_{NIP}$  پس از ۱۲ تکرار.

انتخاب دستی شده از مقاطع برانبارش سطح بارتاب مشترک بستگی دارد. چنانچه به هر علتی در قسمتی از مقاطع نشانگرها، نسبت سیگنال به نوفه کم باشد، به‌طوری‌که تعداد کمی نقطه از این محل‌ها انتخاب دستی شود و یا دقت نقاط انتخاب دستی شده کم باشد، اثرات نامطلوبی به مدل سرعت نهایی وارد خواهد شد؛ چرا که از این نواحی تعداد کمی نقطه داده برداشت شده است و طبیعتاً سرعتی هم که برای این نواحی تعیین می‌شود، خطای بیشتری دارد. در چنین شرایطی، برای تهیه یک مدل سرعت نهایی کوچک، مدل سرعت اولیه نقش پُررنگ‌تری دارد. مدل اولیه مطلوب، مدلی است که بتواند تغییرات کلی سرعت را چه در جهت قائم و چه در جهت افقی نشان دهد. ساده‌ترین راه تهیه مدل اولیه، استفاده از رابطه خطی تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق است (روبین، ۲۰۰۳):

$$v_{inst} = v_0 + k \cdot z. \quad (18)$$

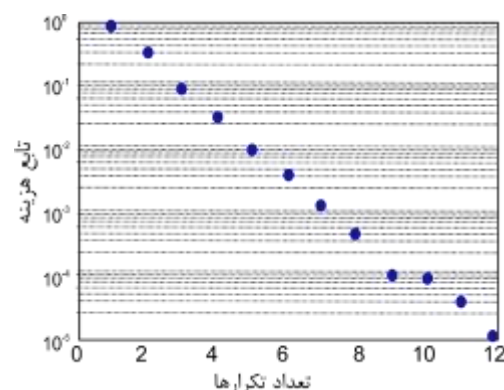
این رابطه، نحوه افزایش سرعت با عمق را با استفاده از ۲ پارامتر نشان می‌دهد؛  $v_0$  درحکم سرعت لحظه‌ای انتشار موج در نزدیک سطح زمین و  $k$  به منزله گرادیان تراکم است که به‌صورت یک ضریب، آهنگ افزایش سرعت با عمق را تعیین می‌کند. همچنین تابع‌های سرعت استاندارد را افراد گوناگون عرضه کرده‌اند که می‌توان از آنها برای توصیف نحوه تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق استفاده کرد. از بین این مدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (روبین، ۲۰۰۳):

$$v_{inst}(z) = v_0(1 + a \cdot z)^b, \quad (19)$$

$$v_{inst}(z) = v_0 e^{k \cdot z}, \quad (20)$$

$$v_{inst}(z) = v_0 a \cdot z^b, \quad (21)$$

$$\frac{1}{v_{inst}(z)} = \frac{1}{v_{mat}} + \left( \frac{1}{v_0} + \frac{1}{v_{mat}} \right) \cdot e^{-k \cdot z} \quad (22)$$



شکل ۷. مثال داده مصنوعی. مقدار تابع هدف  $S$ ، در برابر شماره تکرار. فرایند وارون‌سازی پس از ۱۲ تکرار همگرا می‌شود.

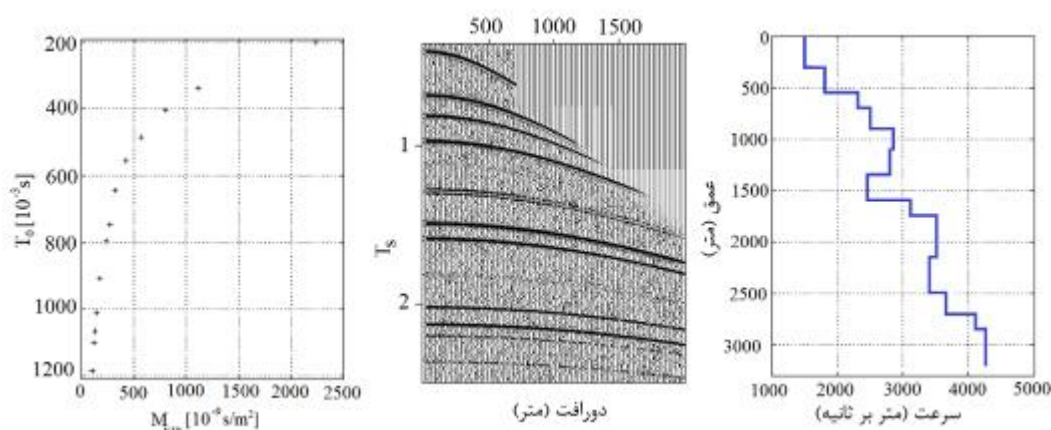
به‌منظور ایجاد داده‌های ورودی به‌منظور اعمال فرایند وارون‌سازی توموگرافی، یک مدل سرعت دو بُعدی که به‌طور جانبی ناهمگن است، تهیه شد. این مدل، همان‌طور که در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، شامل ۶ لایه دارای سرعت‌های ثابت است؛ که در لایه دوم دو بی‌هنجاری سرعت عدسی‌شکل با اندازه‌ها و سرعت‌های متفاوت وجود دارد.

شکل ۱۳-ب حالت تدریجی شده مدل اصلی را نشان می‌دهد. با استفاده از این مدل، یک لرزه‌نگاشت مصنوعی از ۴۰ چشمه با فاصله ۵۰ متر و ۹۶ گیرنده (به‌ازای هر چشمه) با فاصله ۵۰ متر تهیه شد. سپس با اضافه کردن نوفه سفید گاوسی به داده‌های لرزه‌ای مصنوعی، نسبت سیگنال به نوفه به ۱۰ کاهش یافت. در ادامه، با استفاده از فرایند برانبارش سطح بازتاب مشترک، مقاطع نشانگرهای جنبشی میدان موج استخراج شد. در مرحله بعد، نشانگرهای جنبشی میدان موج از داده‌های برداشت شده از مدل فوق، با استفاده از برنامه رایانه‌ای تهیه شده به‌دست آمد. درنهایت، تعداد ۶۷۰ نقطه روی مقاطع دورآفت صفر نشانگرهای میدان موج انتخاب دستی شد. از آنجاکه هر نقطه حاوی چهار پارامتر است، تعداد کل پارامترهای مشاهده‌ای  $4 \times 670$  عدد است. در روش NIP توموگرافی، دقت مدل سرعت نهایی به تعداد، تراکم و دقت نقاط



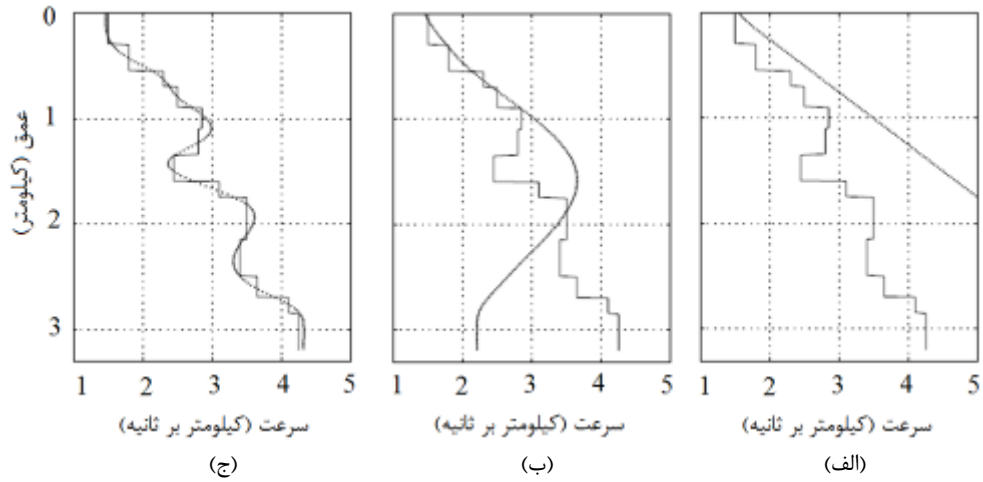
است. در نتیجه، باید برای استفاده از این تابع‌ها، یک مقدار بیشینه برای عمق در نظر گرفته شود. عبارت سوم در تابع بیوفورت، برای حل چنین مشکلی معرفی شده است. در نتیجه میزان سرعت تا حد مشخصی که با  $V_{mat}$  نشان داده می‌شود، افزایش می‌یابد.  $V_{mat}$  بیان‌کننده میزان سرعت انتشار موج در ماتریکس کاملاً تراکم یافته سنگ (مثلاً  $V_{quartz}$  در مورد یک ماسه‌سنگ) است. روابط گوناگون سرعت که در بالا ذکر شد، در شکل ۱۴ در برابر عمق رسم شده‌اند. در همه موارد، میزان سرعت در نزدیک سطح  $v_0 = 1500 \text{ m/s}$  فرض شده است (به جز رابطه فاست) و همچنین فرض شده است که در عمق ۳۰۰۰ متر میزان سرعت لحظه‌ای برابر ۳۵۰۰ متر بر ثانیه باشد. همان‌طور که قبلاً نیز عنوان شد، بهترین مدل سرعت اولیه، برای اجرای توموگرافی، مدلی است که بتواند تغییرات کلی سرعت (لحظه‌ای، بازه‌ای) را در طول نیم‌رخ لرزه‌ای نشان دهد. در این زمینه، سرعت برانبارش می‌تواند گزینه مناسبی باشد. منظور از تغییرات کلی سرعت این است که اگر در قسمتی از نیم‌رخ لرزه‌ای، به علت نفوذ یک توده مثل نمک یا شیل نرم به لایه‌های فوقانی، یک بی‌هنجاری سرعتی ایجاد شده است، این حالت در مدل اولیه نیز تا حدودی مشاهده شود.

معادله‌های (۱۹) تا (۲۲) به ترتیب بیانگر تابع چندجمله‌ای، قانون کیارلی-سرا، قانون فاست و قانون بیوفورت هستند. این تابع‌ها، ما را قادر می‌سازند که فرضیه‌های کلی افزایش سرعت با عمق ناشی از تراکم رسوبات را در نظر بگیریم. باین‌حال، ملاحظاتی در استفاده از این روابط وجود دارد که باید هنگام استفاده از آنها در نظر گرفته شود. در سه رابطه اول فرض می‌شود که سرعت انتشار موج در نزدیکی سطح زمین مشخص است. اما می‌توان از این روابط برای هر عمق مرجعی استفاده کرد. رابطه فاست (هرتوک، ۲۰۰۴) براساس اندازه‌گیری‌هایی از ۵۰۰ پیمایش بررسی چشمه به‌دست آمده است. در ابتدا این رابطه برای به حساب آوردن اثر عمق بر سرعت لحظه‌ای و به‌دست آوردن سرعت بازه‌ای به‌صورت تابعی از عمق لایه داده شد. در کارهای عملی می‌توان از این رابطه به منزله تابع سرعت لحظه‌ای استفاده کرد. طبق رابطه فاست، مقدار سرعت در سطح زمین ( $z=0$ ) برابر صفر است؛ که فرضی اشتباه است. لذا، برای استفاده از این رابطه باید آن را به یک حداقل عمقی محدود کرد. در همه تابع‌های پیش‌گفته به‌جز تابع بیوفورت (هوش، ۲۰۰۲)، میزان سرعت با افزایش عمق به سمت بی‌نهایت میل می‌کند که یک ویژگی غیر واقعی

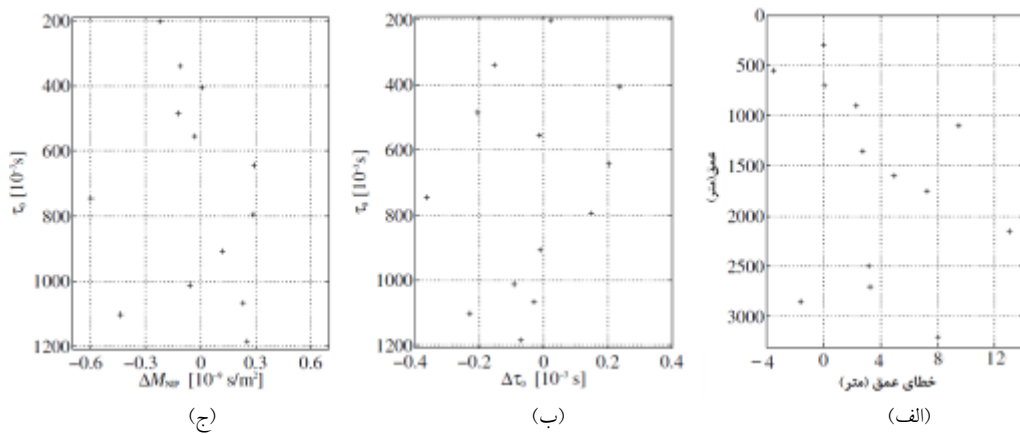


شکل ۸. مثال داده مصنوعی یک‌بُعدی با سطح نوفه ۲۰ دسی‌بل. (الف) ساختار سرعت لایه‌ای یک‌بُعدی (ب) ورداشت CMP مصنوعی که با دنبال کردن پرتو در مدل سرعت (الف) مدل‌سازی شده و به آن نوفه گاوسی اضافه شده است. (ج) داده‌های ورودی و آرون‌سازی توموگرافی که از ورداشت CMP استخراج شده است.

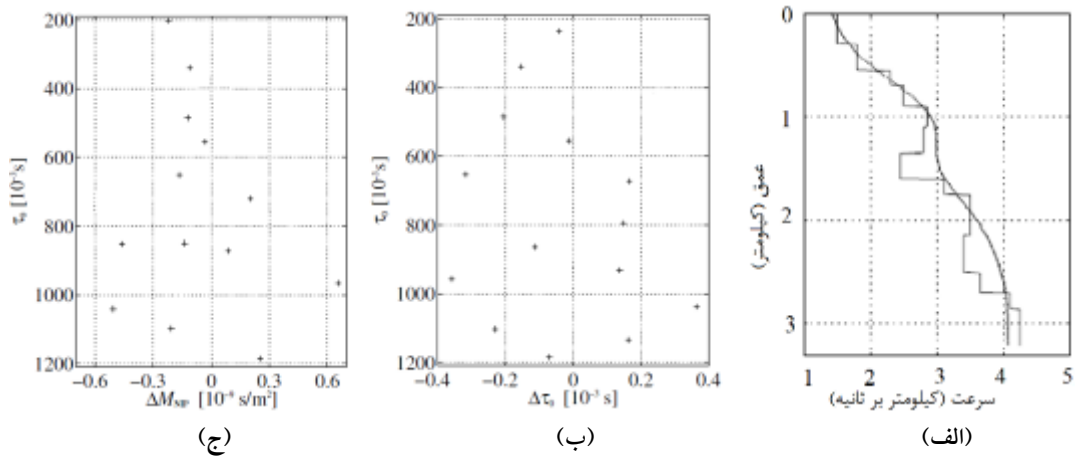




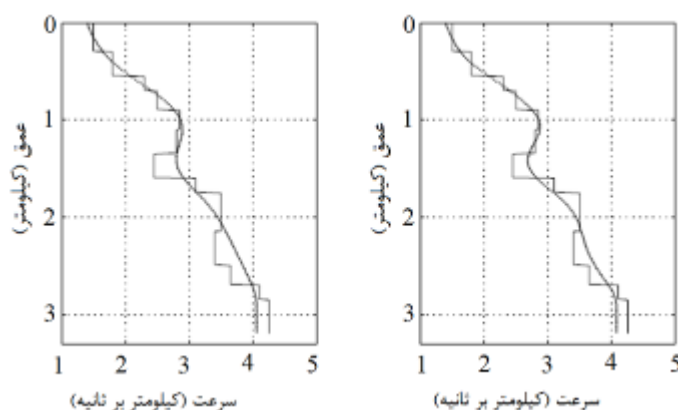
شکل ۹. مثال داده مصنوعی یک‌بعدی با سطح نوفه ۲۰ دسی‌بل. همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه. (الف) مدل سرعت پس از صفر (مدل اولیه) تکرار، (ب) پس از ۴ تکرار و (ج) پس از ۱۲ تکرار. برای مقایسه، مدل سرعت لایه‌ای واقعی نیز رسم شده است.



شکل ۱۰. مثال داده مصنوعی. (الف) اختلاف بین عمق بازتابنده در مدل واقعی (محل پله‌ها در شکل ۸) و مقادیر مدل‌سازی شده طی توموگرافی. (ب) خطای باقی‌مانده در پارامتر  $\tau_0$  پس از ۱۲ تکرار. (ج) خطای باقی‌مانده در  $M_{NIP}$  پس از ۱۲ تکرار.



شکل ۱۱. مثال داده مصنوعی یک‌بعدی با سطح نوفه ۳۰ دسی‌بل. همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه. (الف) مدل سرعت پس از ۱۲ تکرار. برای مقایسه، مدل سرعت لایه‌ای واقعی نیز رسم شده است. (ب) خطای باقی‌مانده در پارامتر  $\tau_0$  پس از ۱۲ تکرار. (ج) خطای باقی‌مانده در  $M_{NIP}$  پس از ۱۲ تکرار.



شکل ۱۲. تهیه مدل سرعت به روش توموگرافی مرسوم در داده مصنوعی یک بُعدی (الف) همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه پس از ۱۲ بار تکرار و (ب) همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه در همان داده با سطح نوفه ۳۰ دسی بل پس از ۱۲ بار. برای مقایسه، مدل سرعت لایه‌ای واقعی نیز رسم شده است.

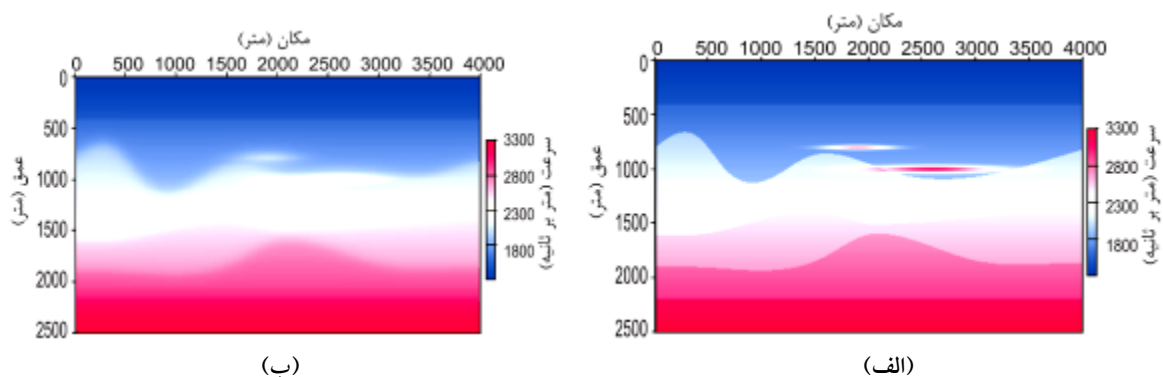
روند وارون‌سازی، پارامترهای مدل، به روش دنبال کردن پرتو، برای همه نقاط داده حاصل می‌شود. تعداد ۱۲ تکرار برای وارون‌سازی غیرخطی این مدل مصنوعی، صورت گرفت. هر کدام از این تکرارها شامل حل دستگاه خطی به روش کمترین مربعات است. در ادامه فرایند وارون‌سازی، ضریب منظم‌سازی "ε طی هر تکرار کاهش می‌یابد تا به همگرایی مدل کمک کند. تصاویر مربوط به تفاوت بین مدل سرعت واقعی و مدل‌های نهایی سرعت حاصل از مدل‌های اولیه متفاوت، نشان می‌دهد که روابط ریاضی مشخص برای تعریف مدل‌های سرعت اولیه برای اجرای NIP توموگرافی، تفاوتی چندانی روی مدل سرعت نهایی نخواهد داشت. اما استفاده از مدل سرعت برانبارش درحکم مدل اولیه، نتیجه بسیار نزدیک‌تری به مدل واقعی به دست می‌دهد.

در همه مدل‌های سرعت که مدل اولیه آنها روابط (۱۹) تا (۲۲) هستند، دو بی‌هنجاری سرعت موجود در مدل واقعی (عمق‌های تقریبی ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر و محل‌های ۱۸۰۰ و ۲۵۰۰ متر) به صورت یک بی‌هنجاری واحد و به طور خفیفی به نمایش درآمده‌اند. باین حال، استفاده از سرعت برانبارش به منزله مدل سرعت اولیه، این دو بی‌هنجاری سرعت را به طور مجزا بازسازی کرده است. علاوه بر این، در محل وجود سه گانه‌های باز نشده (در

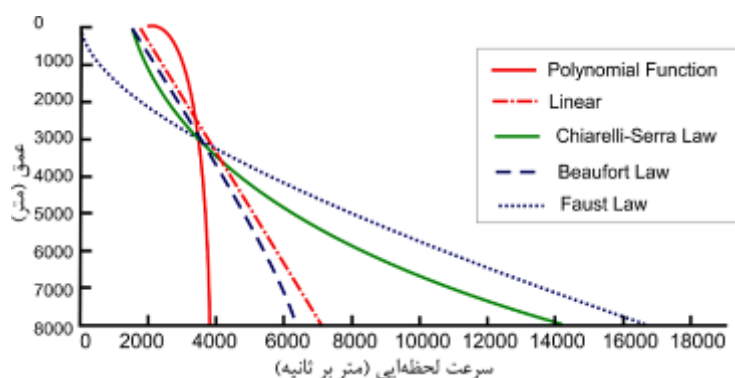
به عبارت دیگر تغییرات جانبی سرعت (در صورت وجود) باید در این مدل اولیه اعمال شده باشد. در روابطی که در بالا ذکر شد، صرفاً تغییرات قائم سرعت که براساس یک رابطه ریاضی تعریف می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. روش مرسوم برای تهیه مدل سرعت برانبارش، استفاده از رابطه شباهت و تهیه مقطع طیف سرعت برای هر CMP است. سپس نقاط دارای مقادیر بیشینه روی این طیف‌ها، انتخاب دستی می‌شوند. با کنار هم قرار دادن این نقاط و درون‌یابی بین آنها، مدل سرعت برانبارش تهیه می‌شود. در عمل، این کار به علت تعداد زیاد CMP ها و یا در برخی موارد، کم بودن نسبت سیگنال به نوفه، امری وقت‌گیر و طاقت‌فرسا است. لازم به ذکر است که این مدل سرعت در حوزه زمان است و برای اجرای کوچ زمانی می‌توان مستقیماً از آن استفاده کرد. در صورتی که مقصود کوچ عمقی باشد، باید این مقطع را به مقطع عمقی تبدیل کرد. برای این منظور، از الگوریتم وارون‌سازی دیکس (۱۹۵۵)، استفاده شده است. مدل‌های سرعت حاصل از مدل‌های اولیه گوناگون (تابع‌های ۱۹ تا ۲۲) به همراه اختلاف آنها با مدل واقعی در شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ به نمایش درآمده است. برای فرایند وارون‌سازی، یک مدل سرعت اولیه با سرعت نزدیک سطح ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و گرادیان قائم سرعت  $0.6 s^{-1}$  تعریف می‌شود. مطابق

برای مسئله‌های خطی، ماتریس کوواریانس مدل نهایی به‌طور خطی به ماتریس کوواریانس داده‌های مشاهده‌ای، که عدم قطعیت در داده‌های ورودی را توصیف می‌کند، مرتبط می‌شود. اما برای مسئله‌های غیرخطی چنین رابطه مشابهی وجود ندارد و خطاهای کوچک در داده‌ها ممکن است منجر به خطاهای خیلی بزرگ در مدل نهایی شوند. در نتیجه این امر ممکن است باعث ناپایداری جواب مسئله وارون شود. پس از به‌دست آوردن سرعت در مدل مصنوعی دو بُعدی به روش NIP توموگرافی، در این بخش تاثیر نوفه بر این روش بررسی می‌شود. همان‌گونه که قبلاً عنوان شده بود، تاثیر پراکندگی نقاط داده در دقت مدل نهایی، در داده‌های دو بُعدی بسیار حائز اهمیت است. در این بخش به‌منظور تاثیر سطح نوفه، داده مصنوعی دو بُعدی که در بخش قبل مورد استفاده قرار گرفته بود، به نوفه با سطح ۲۰ دسی‌بل آغشته شد. نتایج حاصل از روش NIP توموگرافی روی این داده، در شکل ۲۰-الف آورده شده است. همان‌گونه که به نظر می‌رسید، با افزایش سطح نوفه، احتمال به تله افتادن الگوریتم در بیشینه‌ها یا کمینه‌های محلی در مکان‌هایی که بازتابنده حضور نداشته و یا نسبت سیگنال به نوفه در آن قسمت بسیار پایین است، وجود دارد.

مقطع برانبارش، شماره CDPهای ۱۰ تا ۶۰ و بین زمان‌های ۱ تا ۲ ثانیه، مشاهده می‌شود که مقدار سرعت در این ناحیه تفاوت زیادی نسبت به همان ناحیه در مدل واقعی دارد. در واقع برای این محل یک بی‌هنجاری سرعت کاذب به‌وجود آمده است که این مشکل نیز در حالت استفاده از سرعت برانبارش تا حدودی بهبود یافته است. این امر را می‌توان از روی تصاویر مربوط به تفاوت بین مدل واقعی و مدل حاصل از NIP توموگرافی، مشاهده کرد. این تفاوت به علت به‌وجود آمدن مقادیر غیرواقعی برای نشانگرهای جنبشی در محل سه‌گانه‌ها و پراش‌ها ایجاد شده است. همچنین، با مقایسه تصاویر مربوط به اختلاف بین مدل‌های نهایی و مدل واقعی، مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف سرعت در قسمت‌هایی وجود دارد که به علت کم بودن میزان همدوسی در مقاطع نشانگرها، نقاط کمتری انتخاب دستی شده و در نتیجه پرتوهای کمتری از آن نواحی عبور کرده‌اند. اندازه‌گیری حساسیت و میزان پایداری وارون‌سازی توموگرافی در برابر نوفه در داده‌های ورودی را دوونک (۲۰۰۴) عملی ساخته است. براساس این تحقیقات، در حالت مسئله‌های وارون‌سازی خطی، تأثیر خطاها با توزیع گاوسی بر نتایج فرایند وارون‌سازی را می‌توان به سادگی اندازه‌گیری کرد.



شکل ۱۳. (الف) مدل مصنوعی زمین‌شناسی دارای ۶ لایه با ضخامت‌ها و سرعت‌های متفاوت و دارای دو لنز پر سرعت و (ب) حالت نرم شده مدل مصنوعی.



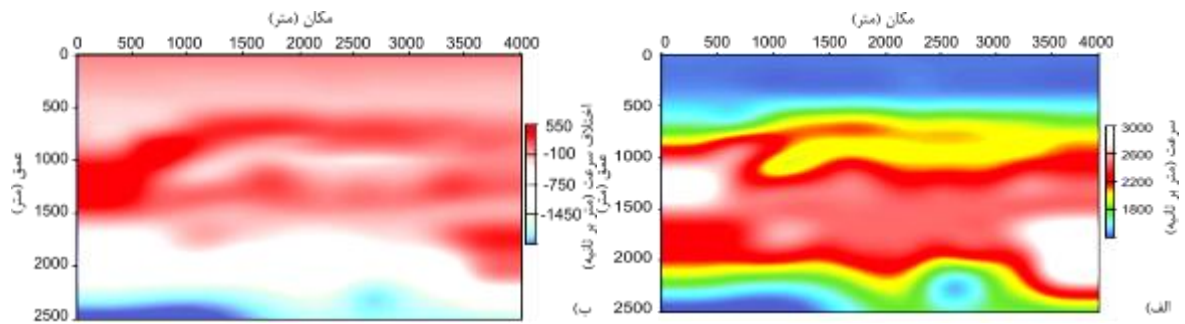
شکل ۱۴. روابط گوناگونی که برای ایجاد مدل سرعت اولیه از آنها استفاده می‌شود، در برابر عمق رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تابع بیوفورت (خط چین آبی) و تابع خطی (خط نقطه سرخ) تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند. در تابع کیارلی-سرا (منحنی سبز) فرض بر این است که تغییرات سرعت لحظه‌ای در عمق‌های بیشتر بسیار شدیدتر از قسمت‌های سطحی است. اما در تابع چندجمله‌ای (منحنی سرخ) عکس این حالت وجود دارد (روبین، ۲۰۰۳).

گرفت. این داده لرزه‌ای شامل ۴۷۹ چشمه با حداکثر تعداد گیرنده به‌ازای هر چشمه است. فاصله چشمه‌ها ۷۰ متر و فاصله گروه گیرنده‌ها ۳۵ متر است. تعداد نقاط میانی مشترک ۱۹۴۸ و داشت و بیشینه چینش این نقاط برابر ۹۶ است. فاصله نقاط میانی مشترک ۱۸ متر است. این داده با آهنگ نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه و طول کل زمانی مقطع ۷/۵ ثانیه برداشت شده است. چشمه لرزه‌ای از نوع دینامیت و بیشینه دورافت بین چشمه و گیرنده نیز ۳۵۰۰ متر است. در ابتدا از داده لرزه‌ای پیش‌پردازش شده مستقیماً برای نقطه شروع تعیین مدل سرعت کوچک با استفاده از روش NIP توموگرافی استفاده می‌شود. پارامترهایی که به‌منظور اجرای برانبارش CRS استفاده شده به‌صورت زیر است؛ بازه دورافت در برانبارش CRS به‌طور خطی از دورافت ۲۰۰ متر در زمان ۰/۲ ثانیه تا دورافت ۲۰۰۰ متر در زمان ۲/۱ ثانیه در نظر گرفته شد. بازه مربوط به نقطه میانی نیز حداقل ۲۰۰ متر در زمان صفر تا ۵۰۰ متر در زمان‌های دیگر است. براساس اطلاعات موجود، سرعت نزدیک به سطح زمین ۱۸۰۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. الگوریتم پیش‌گفته شامل ۳ مرحله جست‌وجوی تک‌پارامتری است.

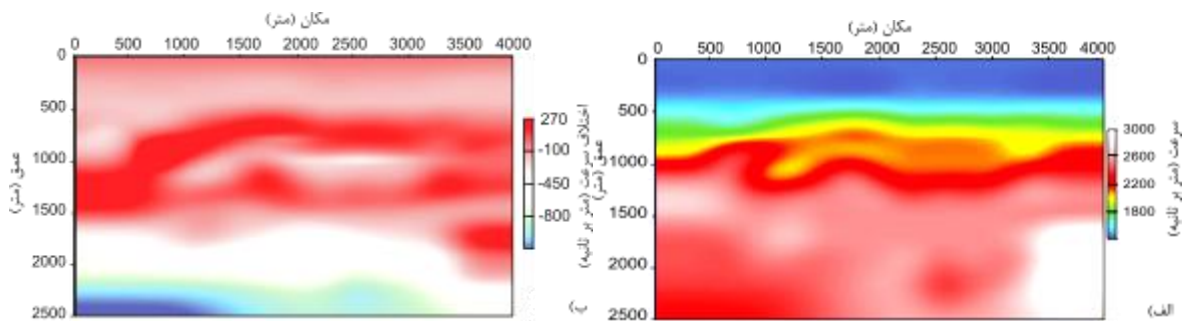
در این روش نیز این مسئله باعث فقدان دقت در دستیابی به جواب بهینه نهایی خواهد شد. بدین سبب همان‌گونه که در شکل ۲۰-الف دیده می‌شود، تعیین دقیق مقدار سرعت در نقاطی که تغییرات قائم و یا جانبی سرعت شدید است، به‌درستی صورت نمی‌گیرد. البته این تغییر سرعت بسیار چشمگیر نیست، چرا که خطای تعیین سرعت در داده با سطح نوفه ۲۰ دسی‌بل، همان‌گونه که در شکل ۲۰-ب دیده می‌شود، قابل چشم‌پوشی است. در ادامه در همین داده سطح نوفه به ۳۰ دسی‌بل افزایش پیدا کرد که مدل‌های سرعت به‌دست آمده از این داده نیز در شکل ۲۱ آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مقدار سرعت در عمق‌های بیشتر و یا در نقاطی که داده‌ای برای انتخاب دستی نبوده است، با دقت کمتری برآورد می‌شود. باین‌حال مقادیر خطای پارامترهای توموگرافی، اگر چه نسبت به سطح ۲۰ دسی‌بل افزایش نشان می‌دهند، ولی همچنان در محدوده قابل قبول قرار دارند.

## ۶ انجام NIP توموگرافی روی داده واقعی

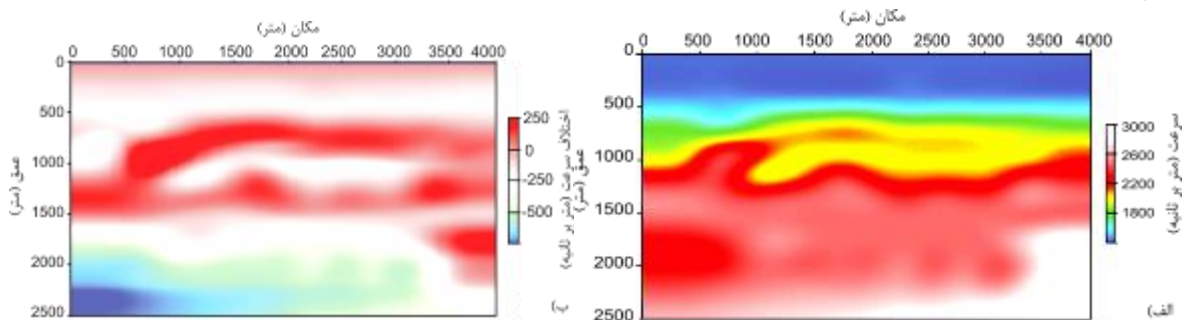
در این تحقیق، یک داده لرزه‌ای دو بُعدی به‌منظور تهیه مدل سرعت به روش NIP توموگرافی مورد پردازش قرار



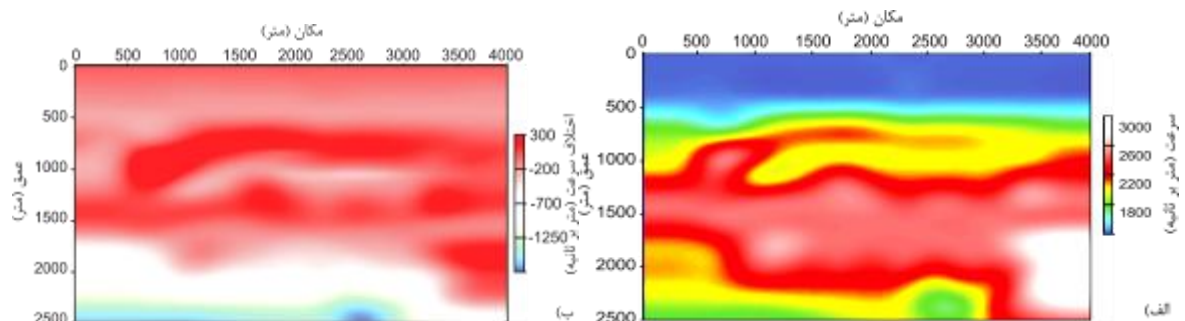
شکل ۱۵. (الف) مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه کبارلی-سرا درحکم مدل اولیه. (ب) تفاضل مدل سرعت پیش‌گفته با مدل سرعت واقعی.



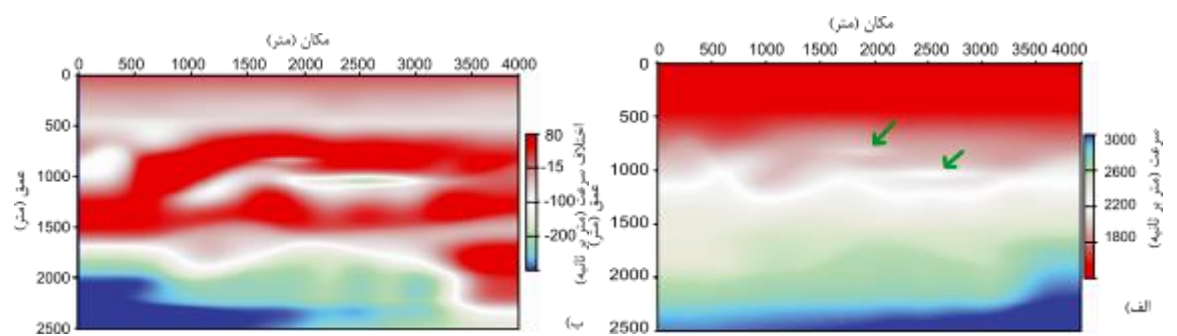
شکل ۱۶. (الف) مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه فاست درحکم مدل اولیه. (ب) تفاضل مدل سرعت پیش‌گفته با مدل سرعت واقعی.



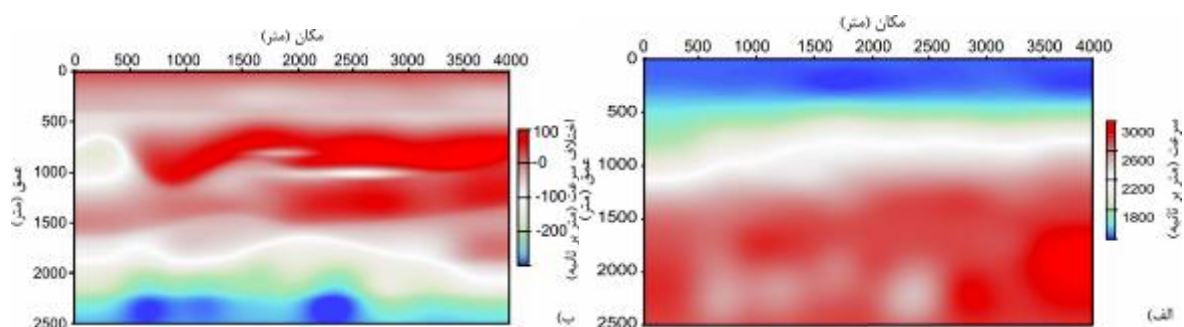
شکل ۱۷. (الف) مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه خطی درحکم مدل اولیه. (ب) تفاضل مدل سرعت پیش‌گفته با مدل سرعت واقعی.



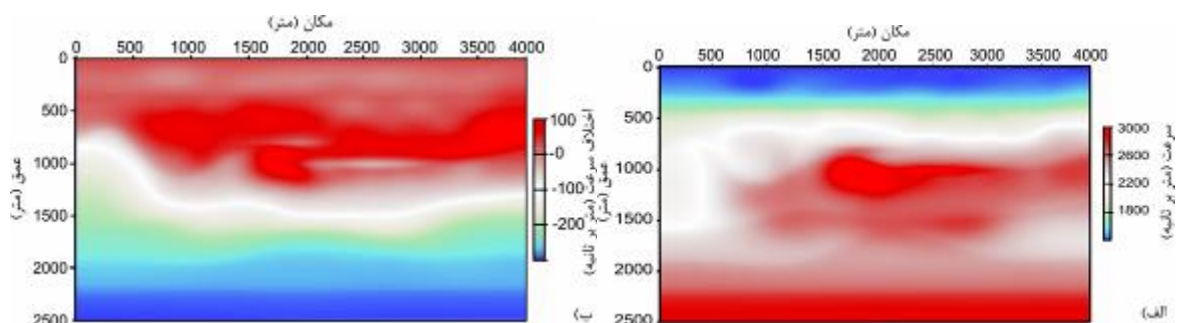
شکل ۱۸. (الف) مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه چندجمله‌ای درحکم مدل اولیه. (ب) تفاضل مدل سرعت پیش‌گفته با مدل سرعت واقعی.



شکل ۱۹. (الف) مدل سرعت حاصل از NIP توموگرافی با سرعت برانبارش درحکم مدل اولیه. (ب) تفاضل مدل سرعت پیش گفته با مدل واقعی.



شکل ۲۰. (الف) مدل سرعت حاصل از NIP توموگرافی با سرعت برانبارش درحکم مدل اولیه با سطح نوفه ۲۰ دسی بل (ب) تفاضل مدل سرعت پیش گفته با مدل واقعی.



شکل ۲۱. (الف) مدل سرعت حاصل از توموگرافی مرسوم با سرعت برانبارش درحکم مدل اولیه با سطح نوفه ۳۰ دسی بل (ب) تفاضل مدل سرعت پیش گفته با مدل واقعی.

۶-۱ توموگرافی با مدل‌های سرعت اولیه متفاوت پس از به دست آوردن نتایج برانبارش CRS، داده‌های ورودی روش NIP توموگرافی از آنها به دست می‌آید. بدین منظور، از روی مقطع شباهت CRS (شکل ۲۲-د)، با در نظر گرفتن یک فاصله زمانی و مکانی، نقاطی که دارای بیشترین شباهت هستند، به صورت خودکار انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از مختصات این نقاط، از روی

بدین معنی طی هر مرحله یک پارامتر تعیین می‌شود و در مرحله بعد با استفاده از این پارامتر، پارامتر دیگری تعیین خواهد شد. پس از اجرای برانبارش CRS، مقاطع زاویه فرود موج،  $\alpha$  و شعاع انحنای جبهه موج نرم می‌شود. نتایج نهایی برانبارش CRS که درحکم ورودی روش NIP توموگرافی از آنها استفاده می‌شود، در شکل‌های ۲۲-الف تا ۲۲-د نشان داده شده‌اند.



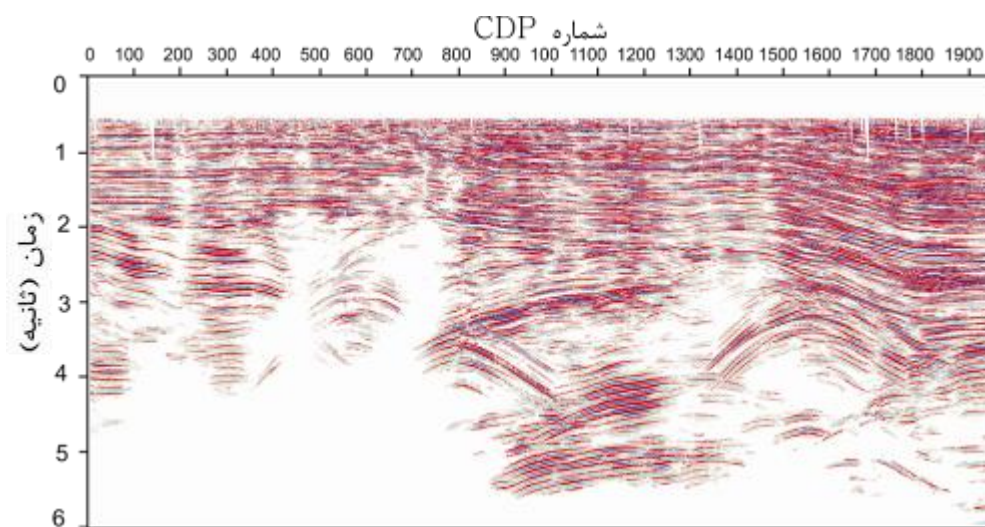
قبل نیز اشاره شد، بهترین مدل سرعت، مدلی است که تفاوت بین پارامترهای داده اصلی و پارامترهای داده مدل‌سازی شده نهایی را به کمترین حد برساند. از این رو، خطای باقی‌مانده در داده‌ها برای رابطه‌های گوناگون مدل سرعت اولیه و پس از همگرا شدن مدل، در برابر  $(x)$  در شکل‌های ۲۹ تا ۳۱ رسم شده‌اند. شکل ۲۹ پارامتر  $\tau_0$  مشاهده‌ای را (که از مقاطع CRS انتخاب دستی شده) نشان می‌دهد. خطای باقی‌مانده در  $\tau_0$  پس از اجرای توموگرافی با مدل‌های سرعت اولیه کیارلی-سرا، فاست، سرعت برانبارش، رابطه خطی و رابطه چندجمله‌ای به ترتیب، در شکل‌های ۲۹-ب، ج، د، ه و نشان داده شده است. با مقایسه این شکل‌ها در نگاه اول، خطای زیادی در  $\tau_0$  برای مدل اولیه فاست مشاهده می‌شود. از طرفی، میزان خطای کمتری در استفاده از سرعت برانبارش و رابطه چندجمله‌ای در حکم مدل سرعت اولیه، دیده می‌شود. در شکل ۳۰ نیز خطای باقی‌مانده در  $M_{NIP}$  مدل‌سازی شده در طی توموگرافی، برای هر مدل اولیه، نشان داده شده است.

در این شکل نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از سرعت برانبارش و رابطه چندجمله‌ای برای مدل اولیه، خطای کمتری در پی خواهد داشت. در نهایت، شکل ۳۱ مقایسه خطای باقی‌مانده در پارامتر  $p(x)$  را برای هر مدل سرعت اولیه، نشان می‌دهد.

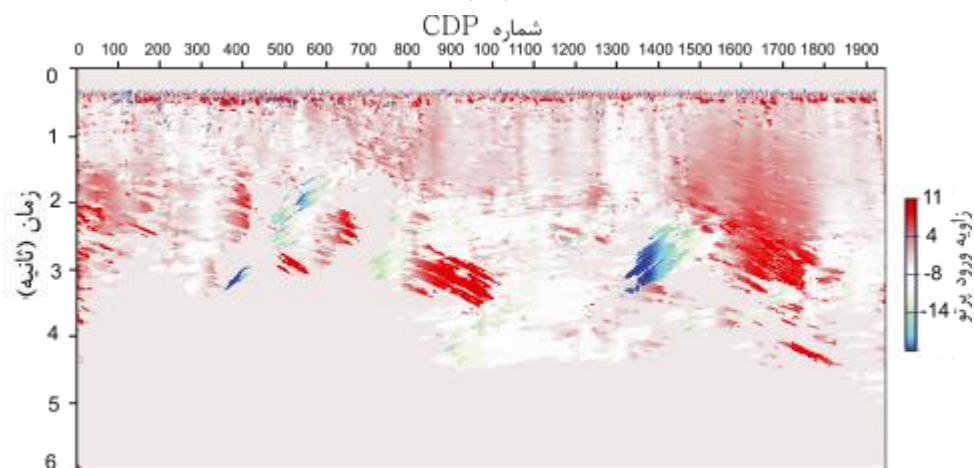
در جدول ۱، برای مقایسه آماری بین مدل‌های اولیه، میانگین مربعات خطای باقی‌مانده برای هر مدل اولیه و همچنین تعداد تکرار برای به‌دست آوردن مدل سرعت نهایی، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از مدل سرعت برانبارش در حکم مدل اولیه NIP توموگرافی، خطای کمتری در پی خواهد داشت. علاوه بر آن، در تعداد تکرار کمتری مدل سرعت نهایی همگرا شده است که این موجب کاهش زمان پردازش می‌شود.

مقاطع نشانگرها (شکل‌های ۲۲-ب و ۲۲-ج)، داده‌های ورودی موردنیاز برای اجرای توموگرافی استخراج می‌شود. پس از اصلاح و حذف نقاطی که روی بازتاب‌های چندگانه قرار گرفته‌اند، تعداد کل ۱۲۲۱۷ نقطه داده انتخاب دستی می‌شود. مدل سرعتی اولیه روی یک شبکه با  $n_x \times n_z = 50 \times 40$  گره اسپلاین دوگانه با فاصله افقی ثابت ۷۰۰ متر و فاصله قائم ۲۰۰ متر تعریف شد. بنابراین، محل گره‌های مربوط به ضرایب اسپلاین دوگانه از  $x=0$  متر تا  $x=34300$  متر در جهت افقی و از عمق  $z=0$  تا  $z=7800$  متر در جهت قائم است. به‌منظور جلوگیری از ایجاد نوسان‌های غیرواقعی سرعت در قسمت‌های کم‌عمق مدل که به علت همدوسی کم، هیچ نقطه‌ای در آن نواحی انتخاب نشده است، باید سرعت نزدیک به سطح برای مدل تعریف کرد که در اینجا براساس اطلاعات موجود، سرعت نزدیک به سطح ۱۸۰۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است.

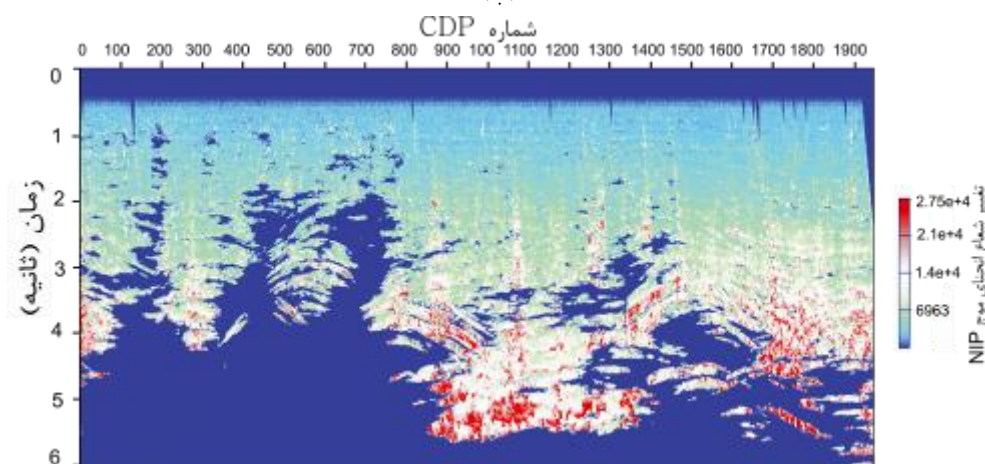
تعیین سرعت نزدیک سطح در حکم داده‌های اضافی تلقی شده که لازم است ضریب وزنی روی آنها اعمال شود. در ادامه با استفاده از مقاطع نشانگرهای بهینه شده، مقطع سرعت برانبارش تهیه شد؛ که بدین‌منظور، برنامه رایانه‌ای جداگانه‌ای به زبان ++C در محیط لینوکس نوشته شد. مدل سرعت برانبارش تهیه شده در حوزه زمان و حوزه عمق برای داده‌های لرزه‌ای، در شکل‌های ۲۳-الف و ۲۳-ب نشان داده شده است. به همین ترتیب، برای هرکدام از معادله‌های سرعت (۱۹) تا (۲۲)، مدل‌های سرعت مربوط به آنها برای منطقه تهیه شد که در شکل‌های ۲۴ تا ۲۷ نشان داده شده و پس از آن مدل سرعت برانبارش در شکل ۲۸ آورده شده است. در این شکل‌ها سعی شده است که از یک مقیاس برای نشان دادن آنها استفاده شود. باین‌حال ممکن است برخی از جزئیات در آنها، به علت شدت بیشتر رنگ‌های اطراف، به‌صورت خیلی واضح مشخص نشود. همان‌طور که در بخش‌های



(الف)



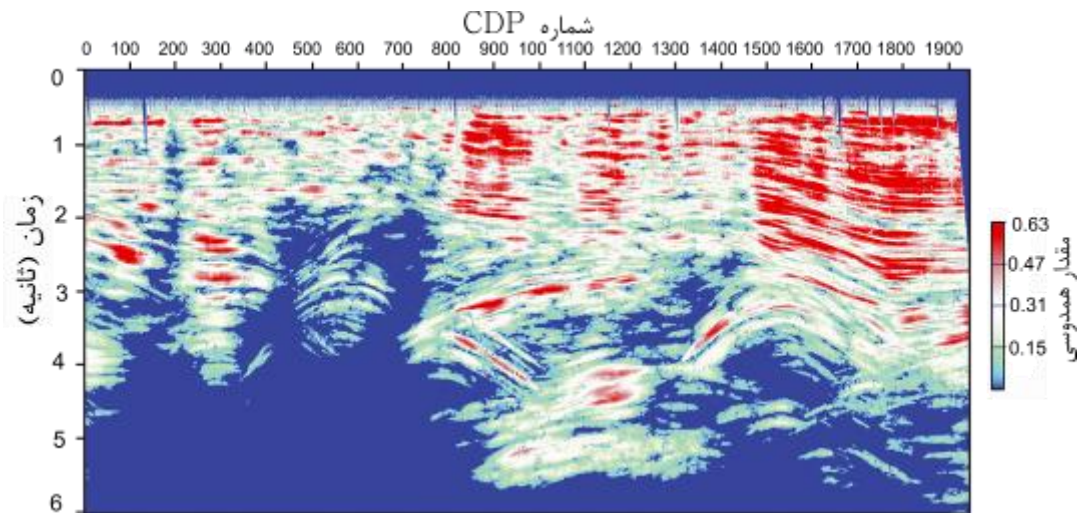
(ب)



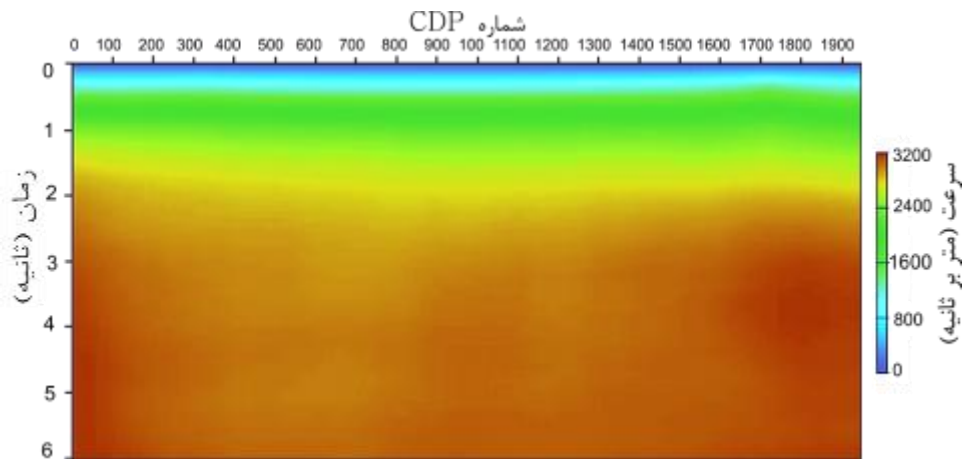
(ج)

شکل ۲۲. (الف) مقطع برانبارش یافته دورآفت صفر به روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، (ب) مقطع زاویه ورود موج NIP به سطح زمین (نسبت به بردار نرمال بر سطح) و (ج) مقطع تغییرات شعاع جبهه موج NIP که در سطح زمین ثبت شده است.

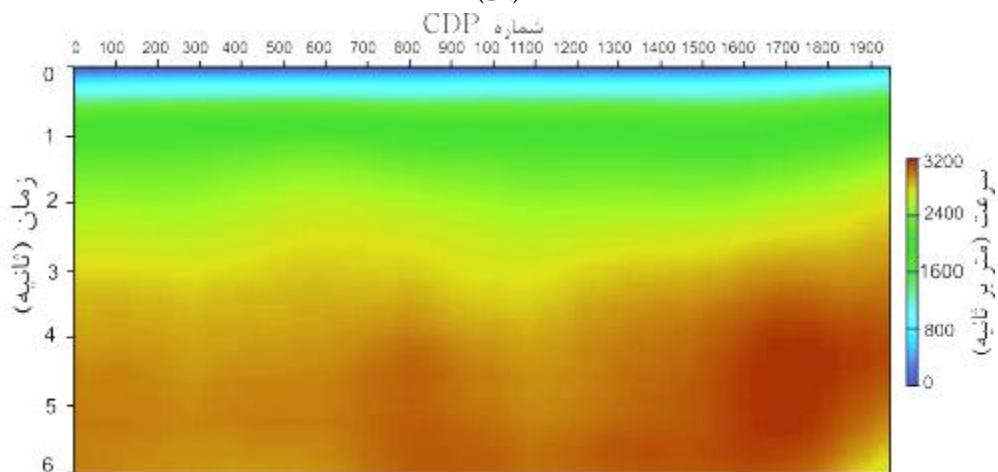




ادامه شکل ۲۲. (د) مقطع هم‌دوسی، که از محصولات جانبی برآیند CRS است. محل نقاط داده برای انتخاب دستی پارامترهای  $R_{NIP}$  و  $\alpha$ ، روی این مقطع مشخص می‌شوند.

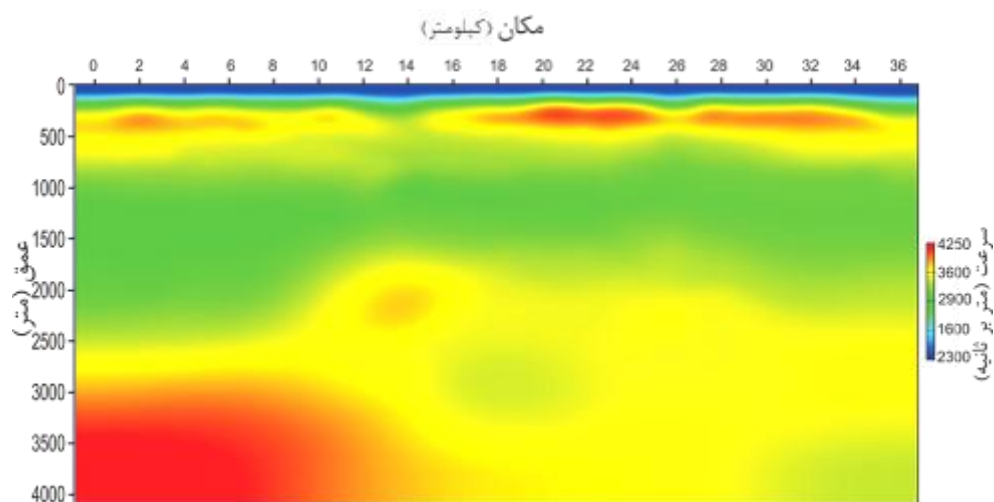


(الف)

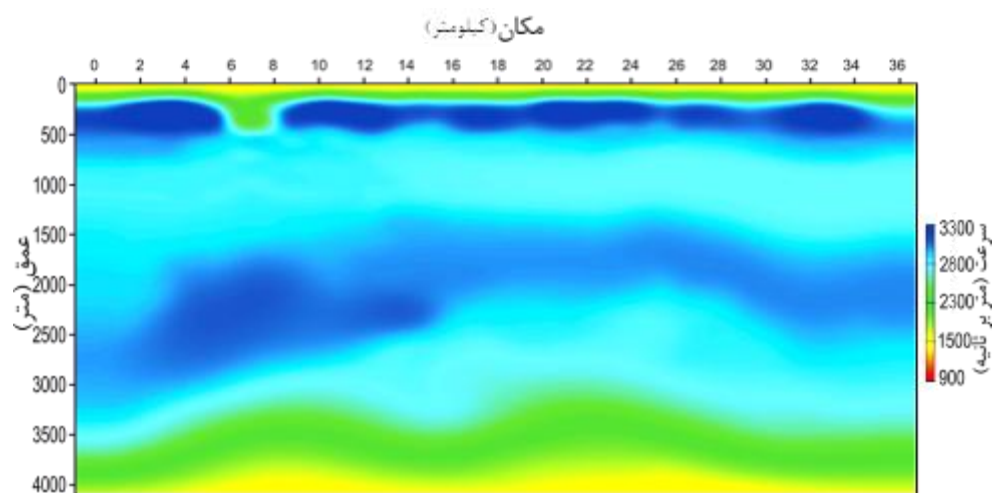


(ب)

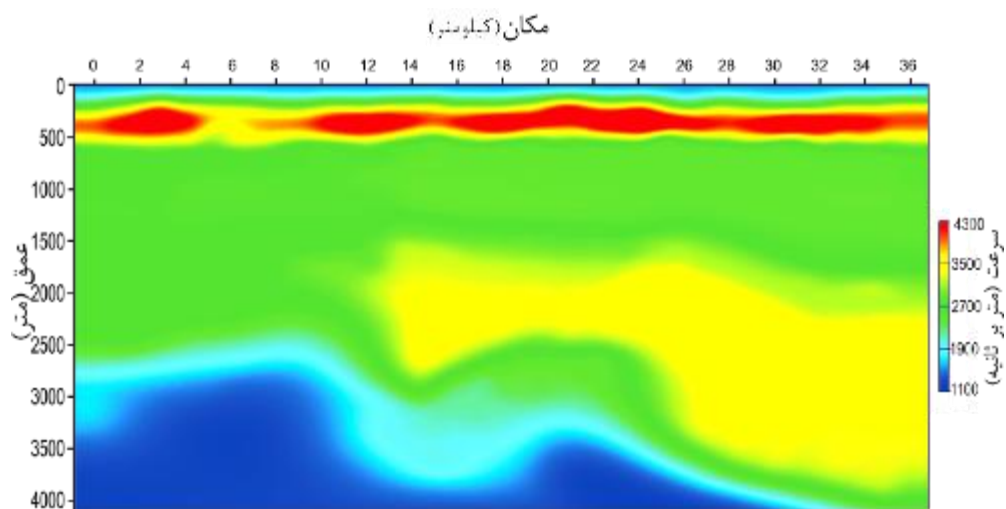
شکل ۲۳. (الف) مدل سرعت برآیند در حوزه زمان، به‌دست آمده از نشانگرهای جنبشی میدان موج. از این مدل در ادامه درحکم یک مدل سرعت اولیه برای توموگرافی استفاده خواهد شد. (ب) مدل سرعت برآیند در حوزه عمق.



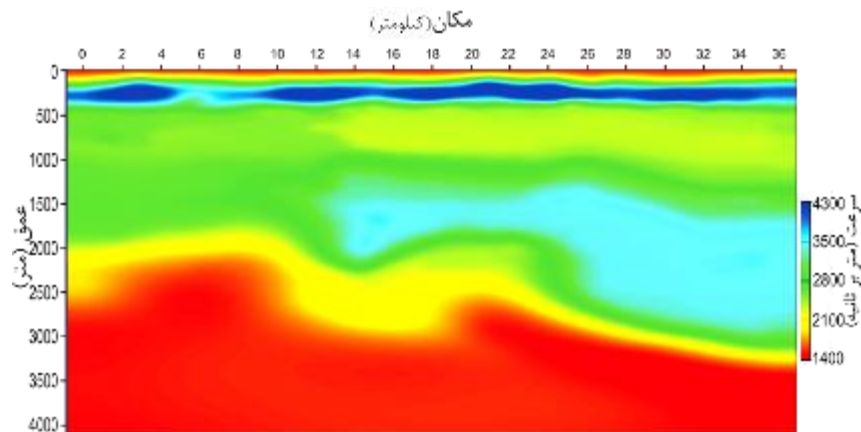
شکل ۲۴. مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه خطی برای تعیین مدل سرعت اولیه.



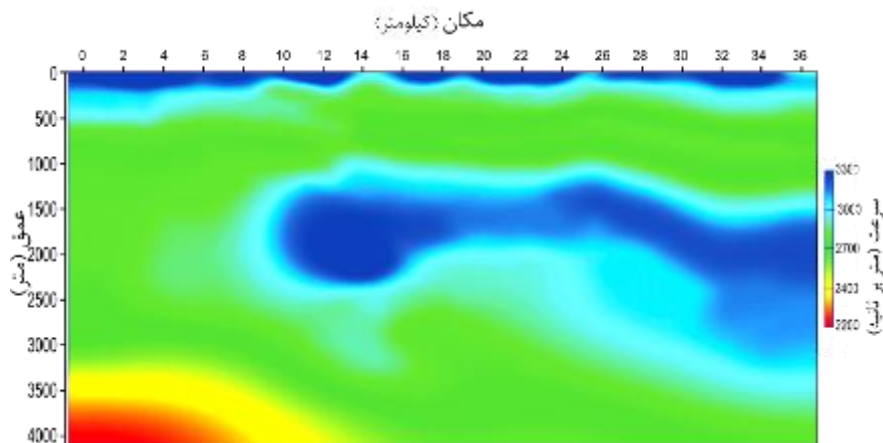
شکل ۲۵. مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه فاست برای تعیین مدل سرعت اولیه.



شکل ۲۶. مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه کبارلی - سرا برای تعیین مدل سرعت اولیه.



شکل ۲۷. مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه چندجمله‌ای برای تعیین مدل سرعت اولیه.



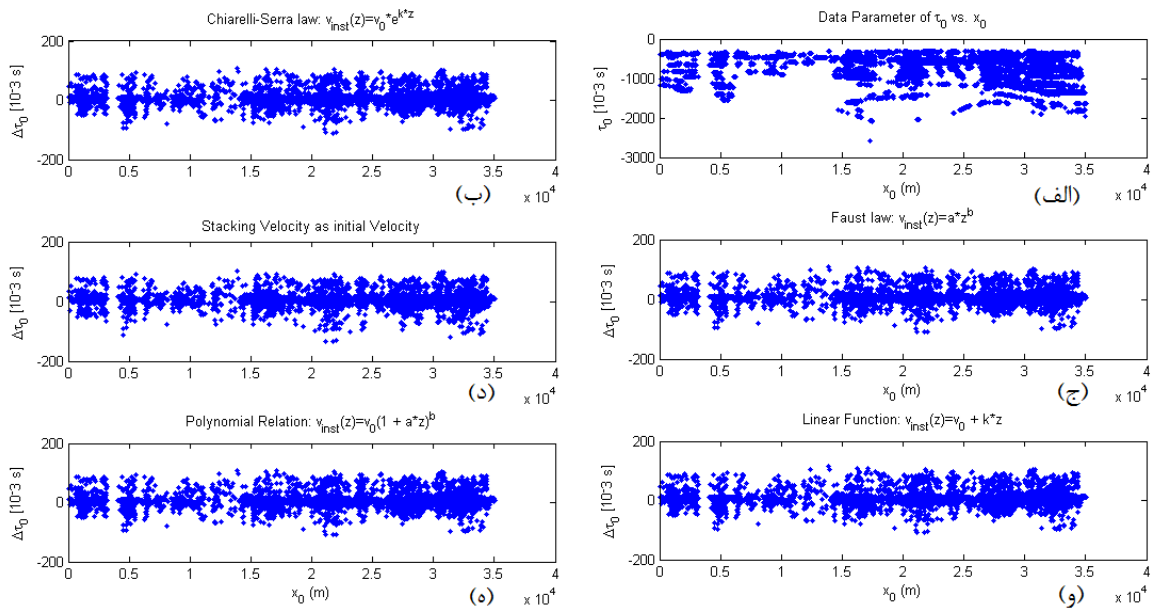
شکل ۲۸. مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از مدل سرعت برانبارش برای تعیین مدل سرعت اولیه.

## ۲-۶ کوچ عمقی

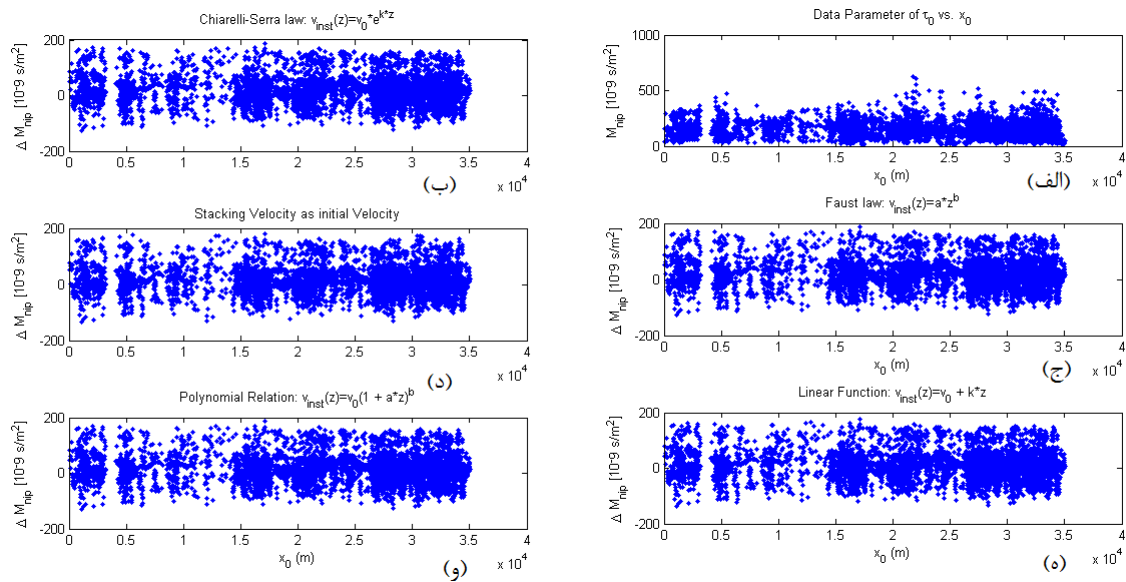
در طول فرایند کوچ لرزه‌ای، شیب‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای به محل واقعی‌شان در زیر سطح زمین منتقل می‌شوند. همچنین، انرژی سیگنال‌های پراش یافته به نقطه‌ای که از آن ناشی شده‌اند، متمرکز می‌شود. برای تبدیل داده‌های لرزه‌ای به یک تصویر ساختاری از زیر سطح زمین، از کوچ پیش از برانبارش عمقی استفاده می‌شود. دقت تصویر لرزه‌ای حاصل به شدت به دقت مدل سرعت کوچ وابسته است. بهترین مدل سرعت کوچ، مدلی است که بهترین نتیجه را از یک الگوریتم کوچ لرزه‌ای به وجود آورد (روبین، ۲۰۰۳). در این مرحله، کارآمدی مدل‌های سرعت به دست آمده، برای اجرای

## کوچ عمقی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

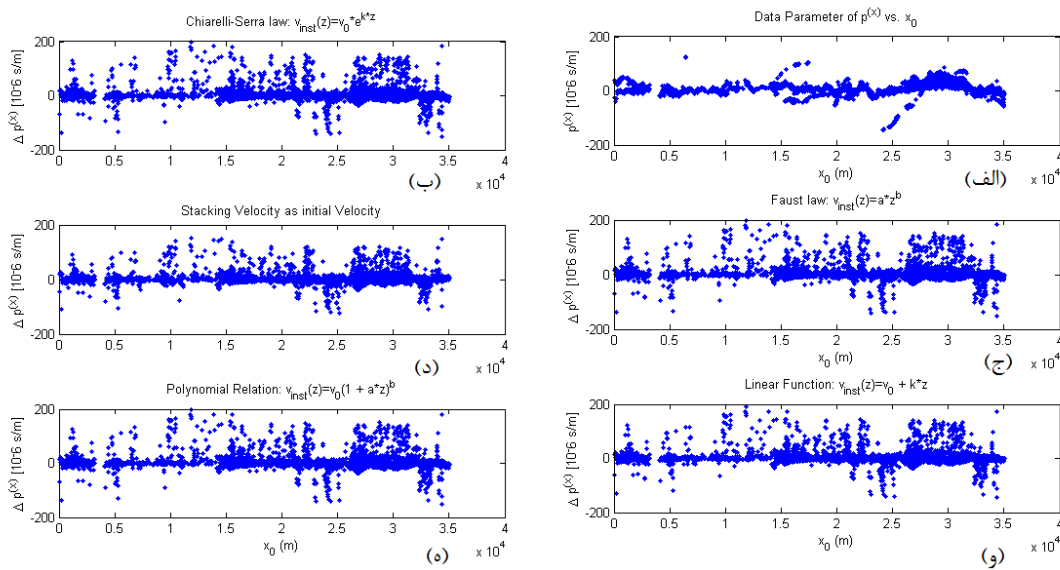
شکل‌های ۳۲ تا ۳۶ کوچ عمقی پس از برانبارش (PostSDM) حاصل از مدل‌های سرعت به دست آمده از مدل‌های اولیه متفاوت را نشان می‌دهد. به منظور اجرای کوچ عمقی، از الگوریتم کوچ کیرشهوف دامنه صحیح (هرتوک، ۲۰۰۴) استفاده شده است. با مقایسه مقاطع کوچ، مشاهده می‌شود که در قسمت‌هایی که ساختار پیچیده‌تری را دربر دارند و با دایره‌های زردرنگ نشان داده شده‌اند، استفاده از مدل سرعت برانبارش در حکم مدل اولیه، بهترین نتیجه را نسبت به سایر مدل‌ها به دست داده است.



**شکل ۲۹.** (الف) پارامتر داده  $\tau_0$  که از داده‌ها استخراج شده، در برابر  $x_0$  رسم شده است. اختلاف بین  $\tau_0$  اصلی و مدل‌سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: (ب) تابع کیارلی-سرا درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. (ج) تابع فاست درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ (د) مدل سرعت برانبارش درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ (ه) تابع خطی درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ (و) تابع چندجمله‌ای درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار.



**شکل ۳۰.** (الف) پارامتر داده  $M_{NIP}$  که از داده‌ها استخراج شده، در برابر  $x_0$  رسم شده است. تفاوت بین  $M_{NIP}$  اصلی و مدل‌سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: (ب) تابع کیارلی-سرا درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. (ج) تابع فاست درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ (د) مدل سرعت برانبارش درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ (ه) تابع خطی درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ (و) تابع چندجمله‌ای درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار.



شکل ۳۱. (الف) پارامتر داده  $P^{(s)}$  که از داده‌ها استخراج شده، در برابر  $x_0$  رسم شده است. اختلاف بین  $P^{(s)}$  اصلی و  $P^{(s)}$  مدل‌سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: (ب) تابع کیارلی - سرا درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. (ج) تابع فاست درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ (د) مدل سرعت برابارش درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ (ه) تابع خطی درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ (و) تابع چندجمله‌ای درحکم مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار.

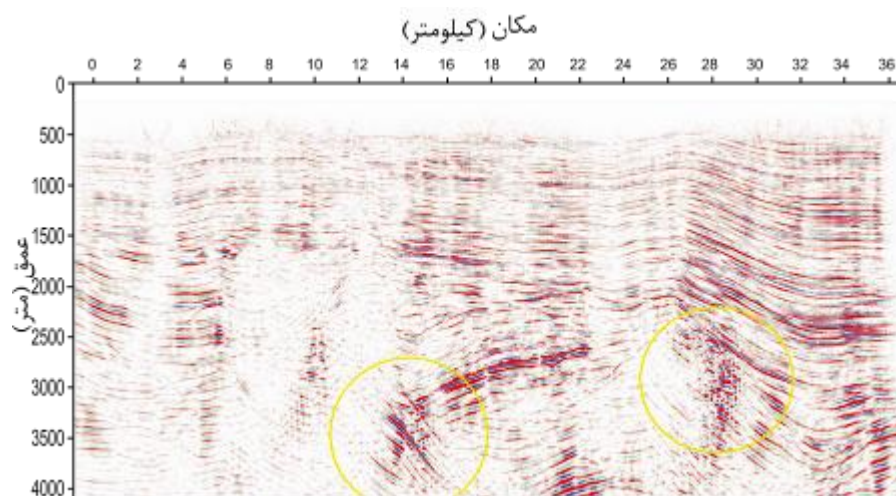
جدول ۱. مقایسه بین خطای باقی‌مانده در پارامترهای داده پس از وارون‌سازی توموگرافی با استفاده از میانگین مربعات خطا.

تعداد تکرار	میانگین مربعات خطای $\Delta p^{(s)}$	میانگین مربعات خطای $(\Delta M_{NIP} \times 10^3)$	میانگین مربعات خطای $\Delta \tau$	
۱۱	۴۶۱ / ۷۸	۲ / ۱۶	۵۱۲ / ۰۲۱	مدل اولیه خطی
۱۲	۵۴۴ / ۴۵	۲ / ۴۲	۴۹۲ / ۰۹	مدل اولیه فاست
۱۲	۵۴۷ / ۵۵	۲ / ۴۳	۴۹۰ / ۴۰۳	مدل اولیه کیارلی - سرا
۱۲	۵۲۲ / ۷۲	۲ / ۳۳	۴۹۴ / ۲۷۴	مدل اولیه چندجمله‌ای
۸	۲۲۳ / ۴	۲ / ۱۶	۴۱۷ / ۲	مدل سرعت برابارش

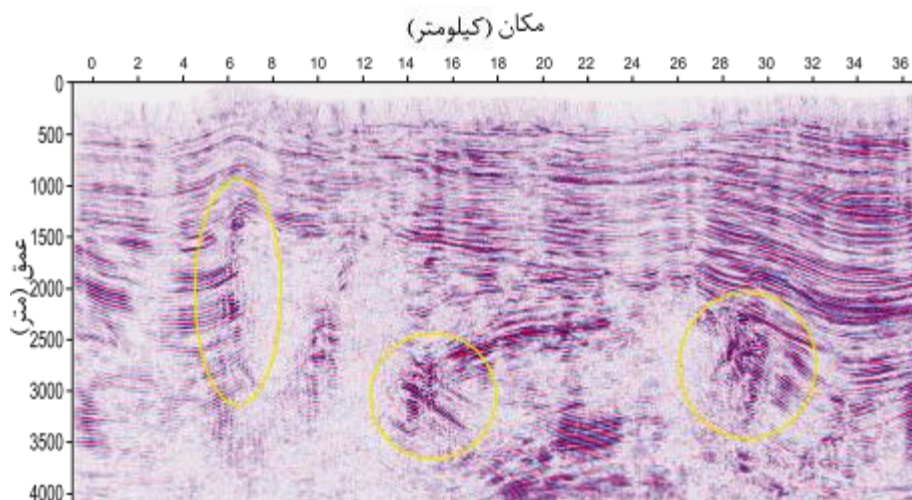
به‌دست آمده از این روش با روش‌های نرمال، از روش تحلیل سرعت کوچ استفاده شد. بدین ترتیب مقطع سرعت نشان داده شده در شکل ۴۱ به‌دست آمد. در این حالت همان‌گونه که دیده می‌شود، سرعت دارای تغییرات جانبی است که به‌خوبی در این مدل نشان داده شده است. سپس به کمک این مدل سرعت، مقطع کوچ عمقی پیش از برابارش به‌دست آمد (شکل ۴۲). همان‌گونه که دیده می‌شود، مقطع کوچ عمقی به‌دست آمده دارای تفکیک افقی بسیار زیادی است که علت آن مدل کردن تغییرات جانبی سرعت است.

همچنین، با استفاده از مدل‌های سرعت رابطه خطی و سرعت برابارش درحکم مدل اولیه، کوچ عمقی پیش از برابارش (PSDM) صورت پذیرفته و به‌ترتیب در شکل‌های ۳۷ و ۳۸ نشان داده شده است. برای مقایسه، چند نمونه برداشت تصویر مشترک (Common Image Gathers, CIG) از هر دو مقطع کوچ در شکل‌های ۳۹ و ۴۰ نشان داده شده. با مقایسه CIG ها، مشاهده می‌شود که در CIG مربوط به مدل سرعت حاصل از سرعت برابارش، رخدادها در عمق‌های بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری بسیار بهتر به حالت افقی درآمده‌اند. به‌منظور مقایسه نتایج

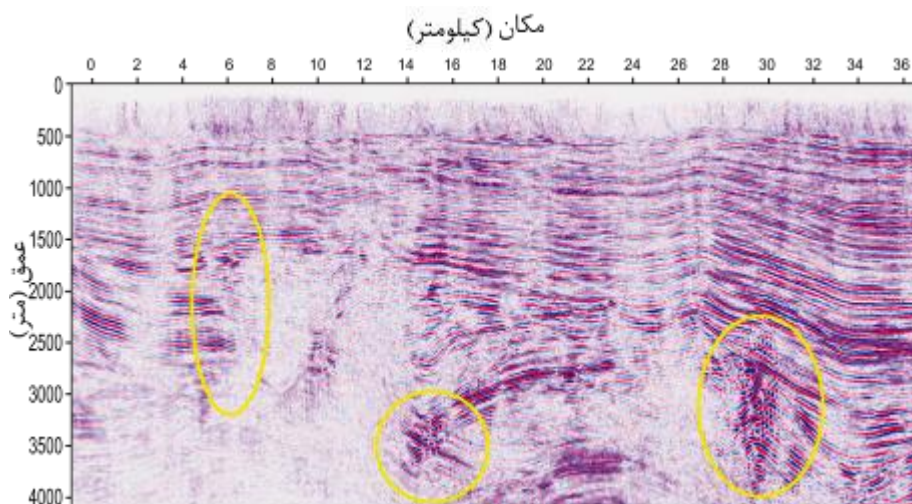




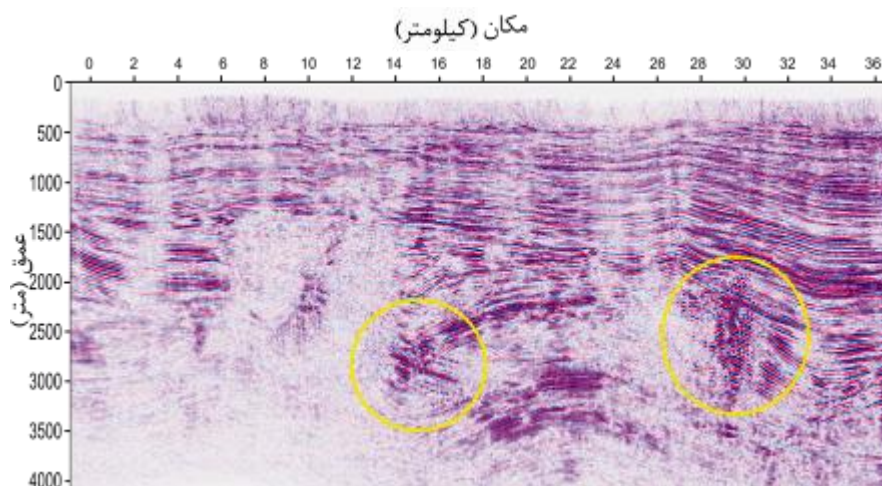
شکل ۳۲. مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت خطی.



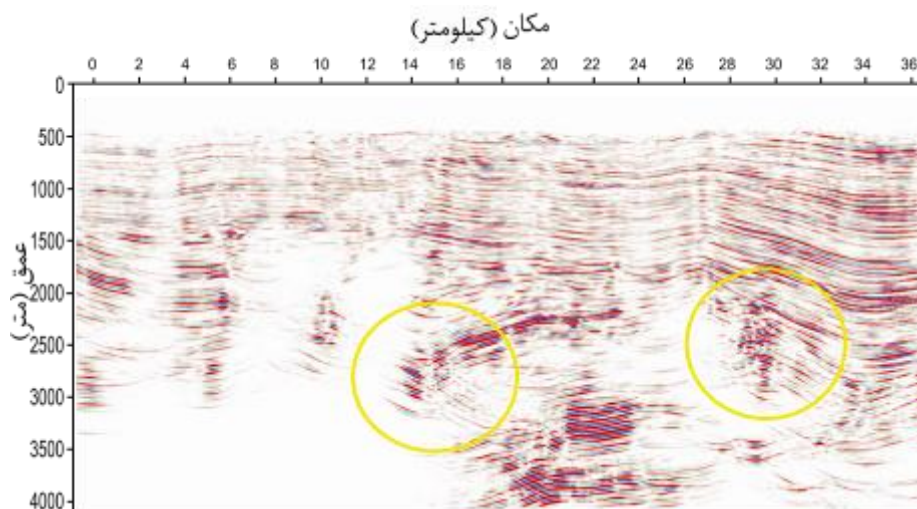
شکل ۳۳. مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت فاست.



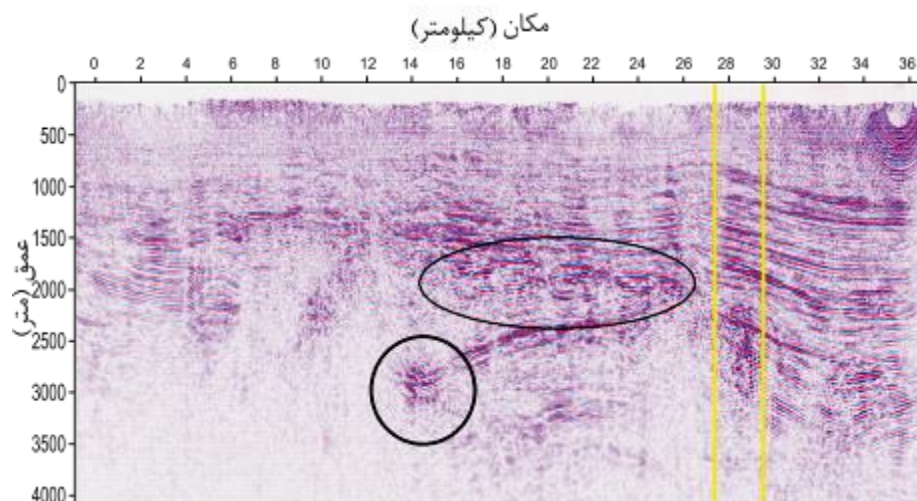
شکل ۳۴. مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت کیارلی-سرا.



شکل ۳۵. مقطع کوچ پس از برآینبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت چندجمله‌ای.

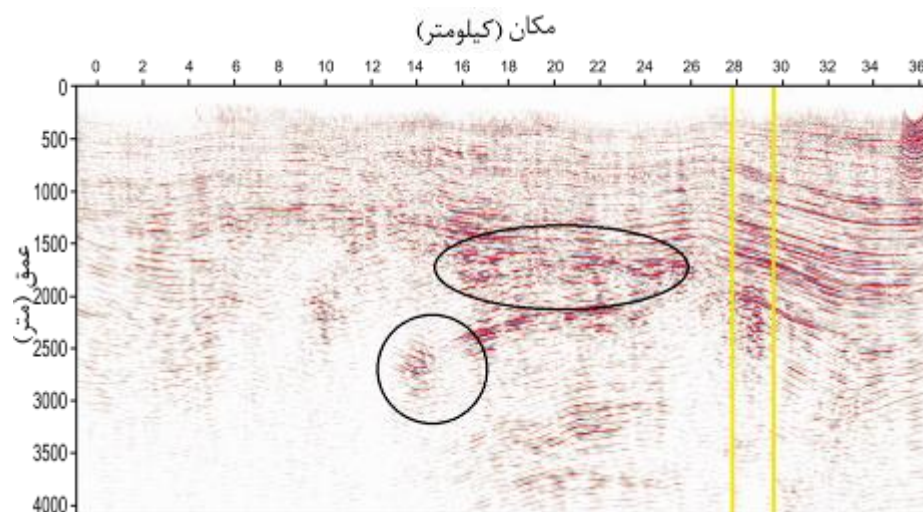


شکل ۳۶. مقطع کوچ پس از برآینبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت برآینبارش.

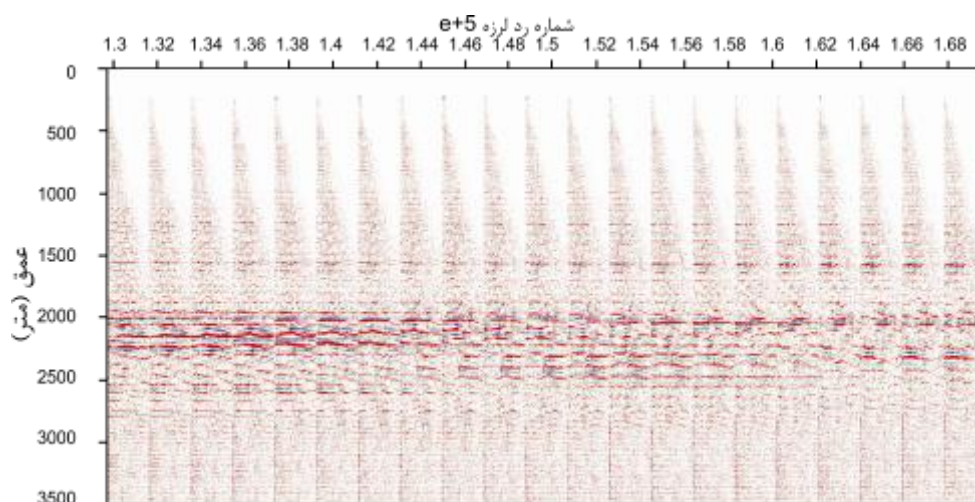


شکل ۳۷. مقطع کوچ پیش از برآینبارش (PSDM) با استفاده از مدل سرعت چندجمله‌ای.

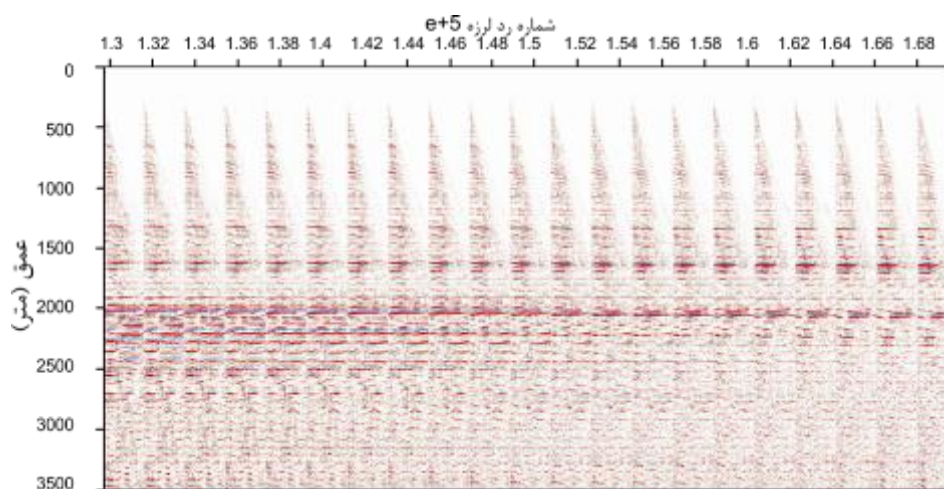




شکل ۳۸. مقطع کوچ پیش از برانبارش (PreSDM) با استفاده از مدل سرعت برانبارش.

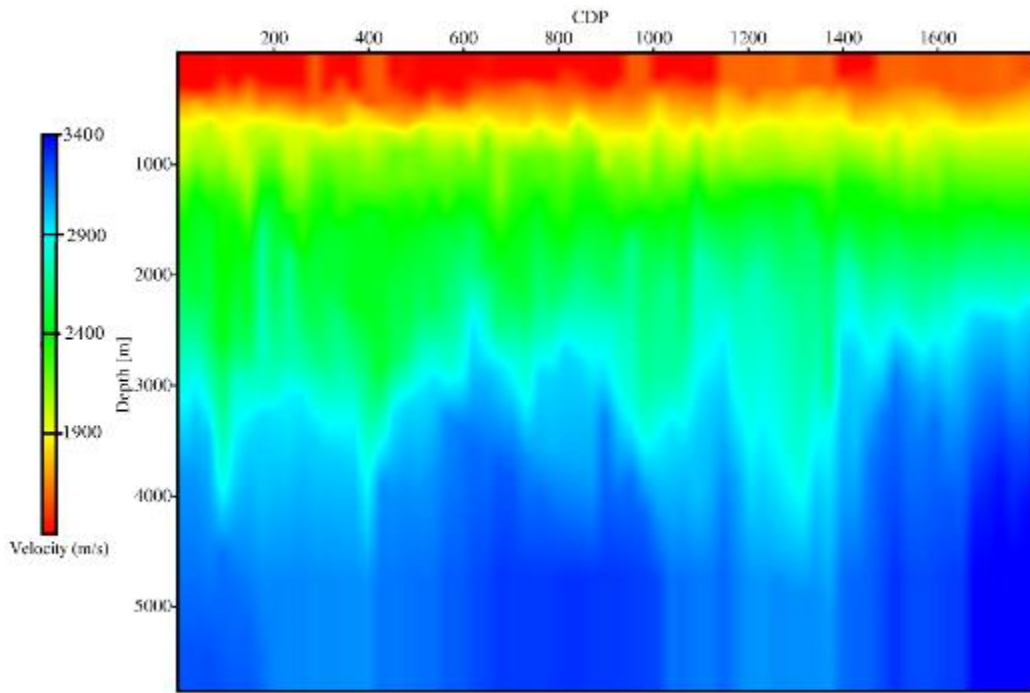


شکل ۳۹. چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل ۳۰ مشخص شده است.

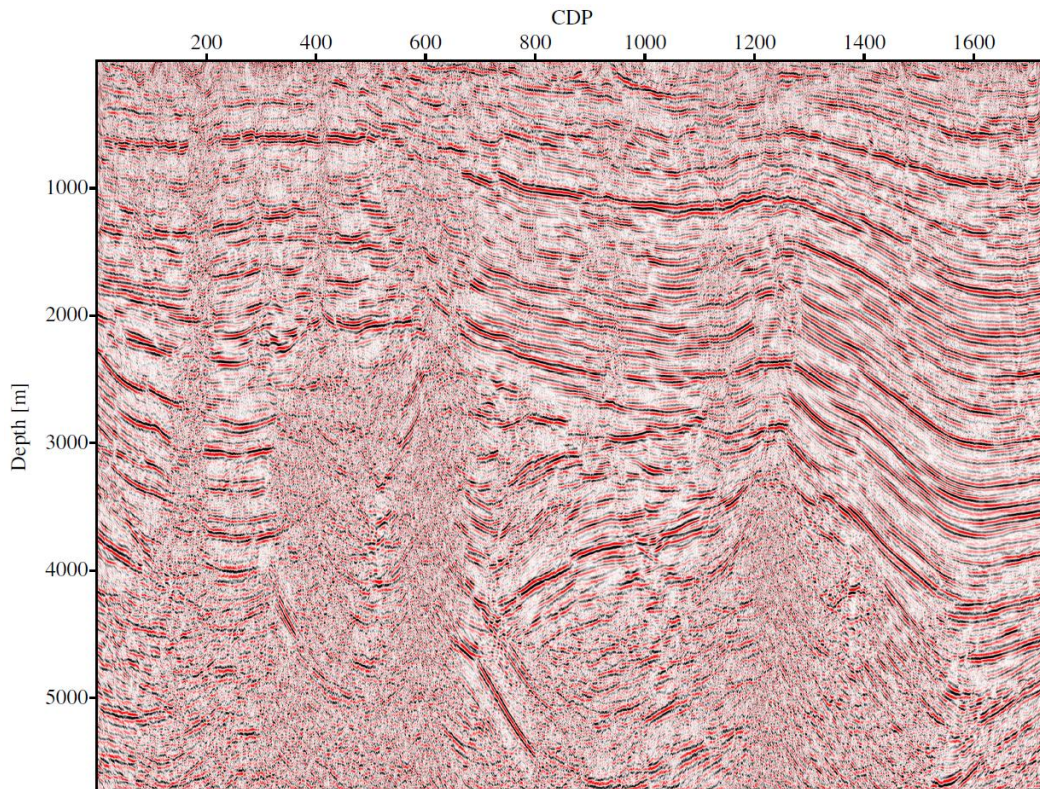


شکل ۴۰. چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل ۳۱ مشخص شده است.





شکل ۴۱. مدل سرعت حاصل تحلیل سرعت کوچ.



شکل ۴۲. مقطع کوچ عمقی پیش از برانبارش (PSDM) با استفاده از مدل سرعت کوچ نشان داده شده در شکل ۴۱.

## ۶-۲ نتیجه گیری

ادامه، از تابع‌های سرعت پیش‌گفته روی مدل دو بُعدی مصنوعی استفاده شد. این مدل شامل بی‌هنجاری‌های سرعت نزدیک به یکدیگر و تغییرات جانبی سرعت بود. مدل‌های نهایی نشان داد که استفاده از تابع تغییرات خطی سرعت که تاکنون از آن استفاده می‌شد و همچنین تابع‌هایی که در سایر تحقیقات معرفی شده‌اند، جواب‌های قابل قبولی به دست نخواهند داد. این روش همچنین روی یک داده واقعی مربوط به شمال شرق ایران نیز اجرا شد. مدل‌های سرعت با تابع‌های متفاوت سرعت تهیه شد و در ادامه با کمک مقطع برانبارش شده، کوچ عمقی پس از برانبارش روی آنها صورت گرفت. نتایج نشان داد که در این منطقه، با توجه به نوع تغییرات سرعت، مدل‌های سرعت با تابع خطی و با مدل اولیه سرعت برانبارش، ساختارهای بیشتری و با کیفیت بهتری را آشکارسازی کردند. با توجه به حساسیت زیاد کوچ عمقی پیش از برانبارش، در ادامه از این دو مدل به منظور کوچ عمقی پیش از برانبارش استفاده شد. نتیجه کوچ عمقی نشان داد که در این منطقه و در شرایط یکسان، مدل سرعت با مدل سرعت اولیه برانبارش، قادر به تهیه مقطع کوچ با کیفیت بالاتری است. همچنین این مدل سرعت با مدل سرعتی که از تحلیل سرعت کوچ به دست آمده بود، مقایسه شد. نتیجه کوچ عمقی پیش از برانبارش به کمک مدل سرعت اخیر نیز نشان داد که نتایج، کاملاً قابل مقایسه با یکدیگر هستند. البته لازم به ذکر است که مدل سرعت به دست آمده به روش NIP توموگرافی، در زمان بسیار کوتاه و کاملاً به شکل خودکار تهیه شده و بسیار نرم است. با مقایسه مقاطع حاصل مشاهده شد که استفاده از سرعت برانبارش در حکم مدل سرعت اولیه در روش NIP توموگرافی بهترین مدل سرعت نهایی را به دست خواهد داد.

داده‌های ورودی روش NIP توموگرافی از روی مقاطع نشانگرهای میدان موج که از محصولات برانبارش سطح بارتاب مشترک هستند، به دست می‌آید. انتخاب دستی نقاط از روی این مقاطع براساس میزان همدوسی صورت می‌گیرد. بدین معنی که رخدادهای بازتابی دارای مقدار همدوسی بیشتر از یک حد مشخص، انتخاب می‌شوند. چنانچه در قسمت‌هایی از مقطع همدوسی، مقدار آن به هر علتی کم باشد، نقاط داده کمی از آن قسمت‌ها انتخاب دستی می‌شود و یا مقادیر نقاط انتخاب دستی شده قابل اعتماد نخواهد بود. بنابراین، در مدل سرعت نهایی مقدار سرعت در این قسمت‌ها نیز قابل اعتماد نیست. در این حالت دقت مدل سرعت اولیه اهمیت ویژه‌ای دارد. بدین معنی که هرچه مدل سرعت اولیه به مدل سرعت نهایی نزدیک‌تر باشد، علاوه بر کمتر شدن زمان وارون‌سازی، دقت مدل سرعت نهایی در قسمت‌هایی که نقاط داده کمتری برداشت شده، بهبود خواهد یافت. در روش NIP توموگرافی فرض شده است که سرعت لحظه‌ای یک تابع خطی از عمق است. در این تحقیق، علاوه بر استفاده از رابطه خطی، از روابط گوناگونی برای تهیه مدل سرعت اولیه استفاده شده است. همه این روابط، صرفاً تغییرات عمقی سرعت را شامل می‌شوند و تغییرات جانبی سرعت در آنها اعمال نمی‌شود. با اعمال برنامه رایانه‌ای تابع‌های پیش‌گفته همراه با تغییرات لازم برای در نظر گرفتن تغییرات جانبی سرعت در روش توموگرافی موج ورودی نرمال روی داده‌های مصنوعی یک بُعدی و دو بُعدی، تاثیر مدل اولیه در این روش، بررسی شد. نتایج وارون‌سازی یک بُعدی به روش پیش‌گفته نشان داد که مدل سرعت تدریجی نهایی پس از ۱۲ تکرار حاصل می‌شود که بسیار به مدل واقعی نزدیک است. خطای بازسازی تعیین عمق بازتابنده کمتر از ۷ متر است. در

## منابع

- 2D and 3D Media and Kinematic Wavefield Attribute.: PhD Thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Iyer, H., and Hirahara, K., 1993, *Seismic Tomography, Theory and Practice*: Chapman & Hall Press, London.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P., 2001, Common reflection surface stack, Image and attributes: *Geophysics*, **66**(1), 97-109.
- Klüver, T., 2007, *Velocity Model Building Using Analytic and Model Based Diffraction Traveltime Functions*: Diploma Thesis, Universität Karlsruhe (KIT).
- Liu, Q., and Gu, J., 2012, Seismic imaging, From classical to adjoint tomography: *Tectonophysics*, **566**, 31-66.
- Mann, J., 2002, *Extensions and Applications of the Common Reflection Surface Stack Method*. Logos Press, Berlin.
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G. and Hubral, P. 1999, Common reflection surface stack, A real data example: *Journal of Applied Geophysics*, **42**, 301-318.
- Rawlinson, N., Pozgay, S., and Fishwick, S., 2010, Seismic tomography, A window into deep Earth: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **178**, 101-135.
- Robbein, E., 2003, *Velocities, Time Imaging and Depth Imaging in Reflection Seismics Principles and Methods*: EAGE publications.
- Sen, M., and Stoffa, P., L., 1995, *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion*: Elsevier, Amsterdam.
- Tape, C., H., Liu, Q., Maggi, A., and Tromp, J., 2010, Seismic tomography of the southern California crust based on spectral element and adjoint methods: *Geophysical Journal International* **180**, 433-462.
- Tarantola, A., and Valette, B., 1982, Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion: *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**, 219-232.
- Tarantola, A. 1987, *Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*: Elsevier, Amsterdam.
- Tarantola, A., 2005. *Inverse Problem, Theory and Methods for Model Parameter Estimation*: SIAM.
- Zhao, L., and Chevrot, S., 2011a, An efficient and flexible approach to the calculation of three dimensional full wave Fréchet kernels for seismic tomography, Part I, Theory: *Geophysical Journal International*, **185**, 922-938.
- Al-Chalabi, M., 1973, Series approximation in velocity and travelttime computations: *Geophysical Prospecting*, **21**, 783-795.
- Al-Yahya, K., 1989, Velocity analysis by iterative profile migration. *Geophysics*: **54**(6), 718-729.
- Bello, L., and Raydan, M., 2007, Convex constrained optimization for the seismic reflection tomography problem: *Journal of Applied Geophysics*, **62**, 158-166.
- Bishop, T., Bube, K., Cutler, R., Langan, R., Love, P., Resnick, J., Shuey, R., Spindler, D., and Wyld, H., 1985, Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media: *Geophysics*, **50**(1), 903-923.
- Boehm, G., Carcione, J., M., and Vesnaver, A., 1996, Reflection tomography versus stacking velocity analysis: *Journal of Applied Geophysics*, **35**(1), 1-13.
- Bozda, E., Trampert, J., and Tromp, J., 2011, Misfit functions for full waveform inversion based on instantaneous phase and envelope measurements: *Geophysical Journal International*, **185**, 845-870.
- Červený, V., 2001, *Seismic Ray Theory*: Cambridge University Press.
- Chiao, L., Y., Fang, H., Y., Gung, Y., Chang, Y., H., and Hung, S., H., 2010, Comparative appraisal of linear inverse models constructed via distinctive parameterizations (comparing distinctly inverted models): *Journal of Geophysical Research*, **115**, 1-11.
- Dix, C., H., 1955, Seismic velocities from surface measurements: *Geophysics*, **20**(1), 68-86.
- Duveneck, E., and Hubral, P., 2002, Tomographic velocity model inversion using kinematic wavefield attributes.: 72<sup>nd</sup> Annual International Meeting., SEG, Extended abstracts, 862-865.
- Duveneck, E., 2004, *Tomographic Determination of Seismic Velocity Models with Kinematic Wavefield Attributes*: Logos Press.
- Farra, V., and Madariaga, R., 1988, Non-linear reflection tomography: *Geophysics*, **J95**, 135-147.
- Flecha, I., Marti, D., Carbonell, R., Escuder-Viruete, J., and Perez-Estaun, A., 2004, Imaging low-velocity anomalies with the aid of seismic tomography: *Tectonophysics*, **388**, 225-238.
- Hertweck, T., 2004, *True-amplitude Kirchhoff Migration, Analytical and Theoretical Considerations*: Logos Press.
- Höcht, G., 2002, *Travelttime Approximations for*

seismic tomography, Part II, Numerical results:  
Geophysical Journal International **185**, 939–  
954.

Zhao, L., and Chevrot, S., 2011b, An efficient and  
flexible approach to the calculation of three  
dimensional full wave Fréchet kernels for