

## تحلیل سرعت به روش شباهت تفاضلی خودران با قدرت تفکیک بالا

عادل مجیدی<sup>۱</sup>، حمیدرضا سیاه‌کوهی<sup>۲\*</sup> و رامین نیکروز<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

(دریافت: ۹۱/۱۲/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

### چکیده

هدف از تحلیل سرعت، به‌دست آوردن مقادیر سرعت برون‌راند نرمال درحکم تابعی از زمان دورافت- صفر نقاط میانی مشترک در طول خط برداشت لرزه‌ای است. از آنجا که دقت نتایج تحلیل سرعت در روش‌هایی که بر پایه شباهت هستند، بستگی به روش به‌کار رفته برای اندازه‌گیری شباهت دارد، عرضه روشی که قدرت تفکیک بیشتری را فراهم آورد ضروری است. اگرچه روش ضریب شباهت (Semblance coefficient) به‌منزله متداول‌ترین روش اندازه‌گیری شباهت، طیف سرعت با دقت خوبی را فراهم می‌آورد، اما افزایش پهن‌شدگی پیک‌های طیف سرعت با ازدیاد عمق، عدم قطعیت در تعیین دقیق سرعت را افزایش می‌دهد. همچنین این روش در تشخیص رویدادهای تداخلی در یک پنجره زمانی کوتاه، وجود پدیده معکوس شدگی قطبیدگی و در مدل‌های زمین با لایه‌بندی نازک، درست عمل نمی‌کند.

برای به‌دست آوردن طیف سرعت دقیق‌تر، در این مقاله دو روش جدید شباهت تفاضلی معین و شباهت تفاضلی خودران با قدرت تفکیک زیاد برای اندازه‌گیری شباهت معرفی می‌شود که بر پایه شباهت تفاضلی (Differential-semblance) هستند و با مقدار ضریب شباهت به‌دست آمده وزن‌دار می‌شوند. در این روش‌ها از فن خودرانی (Bootstrapping)، برای چپ‌نش تصادفی ردلرزه‌های ثبت نقطه میانی مشترک استفاده می‌شود تا انحراف زمان رسید آنها را از حالت افقی بهتر نشان داده و موجب افزایش ضریب شباهت تفاضلی شود. این روش‌ها با کمی هزینه محاسباتی بیشتر، قدرت تفکیک بیشتری را نسبت به روش شباهت متداول فراهم می‌آورد. افزایش در قدرت تفکیک طیف سرعت به وسیله روش‌های پیشنهاد شده، با اجرای آنها روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی آشکار و با روش مرسوم ضریب شباهت مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: روش خودران، تحلیل سرعت، شباهت تفاضلی، تصحیح برون‌راند نرمال

## Velocity analysis using high-resolution bootstrapped differential-semblance

Majidi, A.<sup>1</sup>, Siahkoochi, H. R.<sup>2</sup> and Nikrouz, R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student of Geophysics, Department of Geology, Urmia University, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Geology, Urmia University, Iran

(Received: 10 Mar 2013, Accepted: 08 Oct 2013)

### Summary

The purpose of velocity analysis is to extract the normal moveout velocity as a function of the zero-offset travel time at selected CDP locations along the seismic line. Since results of velocity analysis depend on coherency estimator, an estimator that provides a high velocity resolution is essential. Even though the conventional semblance method which is the most popular coherency estimator (Tanner and Kohler, 1969) provides a robust velocity spectrum, the tendency to smear the velocity peaks as the time increases makes

the estimation of accurate velocity difficult. This estimator, however, has some resolution limits that cause problems in some cases. It fails to distinguish interfering events in a short time window and in cases of thin bedding (Lerner and Cellis, 2007).

We propose here two new coherency estimators that resolve these limitations at a minor extra-cost. The estimators are based on a differential semblance (DS) coefficient (Symes and Carazzone, 1991) that is weighted by the semblance estimator. High-resolution is introduced by sorting the traces in the data in a way that highlights the time shifts between adjacent traces within a time gate. The new estimators exploit the redundancy of seismic data in the common mid-point (CMP) to bootstrap the seismic traces in a manner that nicely brings time shifts between adjacent traces to discriminate time gates built using parameters that are close to the true stacking parameters. Bootstrapping is a statistical technique used to infer estimates of standard errors and confidence interval from data samples for which the statistical properties are unattainable via simple means. The first proposed estimator is deterministic bootstrapped differential semblance (BDS) that is based on a deterministic sorting of original offset traces by alternating near and far offsets to achieve maximized time shifts between adjacent traces. Deterministic sorting that alternates near- and far-offset traces in the time window has higher resolution than does simple bootstrapping applied to the data traces. The second was the product of several BDS terms, with the first term being the deterministic BDS defined above. The other terms were generated by random sorting of traces that alternated between near and far offsets in an unpredictable manner. The proposed estimators help in discriminating several trial parameters which produce a good guess of the flattening parameters and have direct implications in retrieving velocity information from time gathers. The suggested estimators are tested on synthetic and real data examples to show the gain in resolution they yield when applied, and they are compared with coefficient semblance. Results show that deterministic BDS coefficient provides an increased resolution with no extra computing effort compared to the BDS coefficient. Further resolution can be achieved by involving several controlled bootstrapping outcomes in the estimator, but this comes at a computing cost nearly proportional to the number of terms in the high resolution estimator.

The high-resolution BDS proves to be an efficient tool in building velocity spectra for time-domain velocity analysis and it provides more resolution with respect to conventional semblance estimator. The proposed estimators could be a good substitute for the semblance coefficient, and an economic alternative to other high resolution estimators such as eigenvalue methods that are expensive for the dense parameter tracking in high fold data sets.

**Keywords:** Bootstrap method, Velocity analysis, Differential semblance, Normal moveout correction

## ۱ مقدمه

برابارش ردلرزه‌ها، در ثبت‌های نقطه میانی مشترک به کار برده می‌شوند. بنابراین لازمه یک برابارش بهتر و در نتیجه مقطع لرزه‌ای با کیفیت بهتر اجرای یک تحلیل سرعت دقیق‌تر است.  
به علت حساسیت کم نسبت به تغییرات دامنه بر حسب

ضرورت تصحیح برون‌راند نرمال (NMO) و نبود اطلاعات در مورد سرعت بازتاب‌های لرزه‌ای، مهم‌ترین دلایلی هستند که ما را نیازمند تحلیل سرعت روی داده‌های لرزه‌ای می‌کنند. سرعت‌های به‌دست آمده از تحلیل سرعت برای به‌خط کردن رویدادهای بازتابی و

طیف سرعت با قدرت تفکیک زیاد را با هزینه محاسباتی قابل مقایسه با روش ضریب شباهت تضمین می‌کنند. این برآوردگرهای شباهت از ویژگی فراوانی داده در ثبت نقطه میانی مشترک، و روش خودرانی برای نشان دادن تغییرات در جابه‌جایی موجک داخل پنجره زمانی، در برآورد شباهت تفاضلی به‌نجار استفاده می‌کنند. نرم‌افزار این روش‌ها در محیط مت‌کب (MATLAB) را نگارندگان نوشته‌اند و روی داده‌های مصنوعی و واقعی اعمال و خروجی را با نتایج روش ضریب شباهت مقایسه کرده‌اند.

## ۲ ضریب شباهت

تحلیل سرعت رهیافتی با هدف شناسایی بازتاب‌های اولیه و پارمترهای مربوط به آنها (سرعت، زمان دورافت- صفر) در یک ثبت نقطه میانی مشترک است. تحلیل سرعت هذلولی با پیمایش یک گستره از سرعت‌های فرضی صورت می‌گیرد و حول هر هذلولی یک پنجره زمانی ساخته می‌شود. از داده محدود به هر پنجره زمانی که به اختصار  $d(t, x)$  نوشته می‌شود، برای محاسبه ضریب شباهت استفاده می‌شود. اندازه‌گیری همدوسی بر مبنای ضریب شباهت به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (تانر و کوهلر، ۱۹۶۹):

$$S = \frac{\sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} (\sum_{i=1}^N d(t, x_i))^2}{N \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=1}^N d(t, x_i)^2} \quad (1)$$

که در آن،  $N$  تعداد ردلرزه‌ها و  $w$  پهنای پنجره زمانی برحسب ثانیه را مشخص می‌کند و  $i$  شمارنده ردلرزه‌ها است. طبق رابطه (۱) مقدار  $S$  همیشه بین صفر و یک تغییر می‌کند.

شکل ۱ حساسیت برون‌راند به تغییرات سرعت را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱-الف، ۱-ب و ۱-ج حول زمان دورافت- صفر مساوی ۲ ثانیه به‌ترتیب با استفاده از

دورافت، گستره دینامیکی کوچک و همچنین هزینه محاسباتی کم، روش ضریب شباهت به‌منزله متداول‌ترین روش اندازه‌گیری همدوسی در تحلیل سرعت به‌کار می‌رود (تانر و کوهلر، ۱۹۶۹). با وجود این، تاکنون چندین روش اندازه‌گیری همدوسی به‌منظور افزایش قدرت تفکیک در تحلیل سرعت داده شده است که دارای پایداری بهتر نسبت به نوفه، کنترل بهتر تغییرات فاز با دورافت و قدرت تشخیص بیشتر در بین چند پارامتر که منحنی‌های برون‌راند مشابه تولید می‌کنند، هستند (اشنایدر و بکاس، ۱۹۶۸؛ شرود و پو، ۱۹۷۲؛ بیوندی و کوستو، ۱۹۸۹؛ کی و اسمیتسون، ۱۹۹۰؛ سیمز و کارازون، ۱۹۹۱؛ فولر و کرلین، ۱۹۹۲؛ ساشی، ۱۹۹۸؛ لارنر و سیلز، ۲۰۰۷؛ عباد و همکاران، ۲۰۰۹).

خودرانی یک روش آماری است که با استفاده از دوباره نمونه‌برداری (Resampling) تصادفی از داده اولیه، برآورد ویژگی‌های آماری داده از قبیل میانگین، واریانس و بازه اطمینان را برای مسائلی که روابط تحلیلی برای تابع چگالی احتمال آنها نامعلوم و یا برآورد آن مشکل است، میسر می‌سازد (افرون، ۱۹۷۹). ساشی (۱۹۹۸) از روش خودرانی برای ساختن طیف سرعت با قدرت تفکیک زیاد استفاده کرده است. وی این کار را با میانگین‌گیری از نتایج به‌دست آمده از تعداد زیادی برآورد همدوسی برپایه ویژه‌ساختار حساس به ترتیب قرارگیری ردلرزه‌ها در درون پنجره زمانی، عملی ساخته است. از محدودیت‌های اصلی این روش استفاده از تعداد زیادی عمل خودرانی برای بهبود قدرت تفکیک و گستره دینامیکی بزرگ است که می‌تواند در طیف، بازتاب‌های ضعیف ثبت را بپوشاند.

در این مقاله ابتدا روش ضریب شباهت مرسوم (تانر و کوهلر، ۱۹۶۹) مرور می‌شود. سپس روش‌های جدید اندازه‌گیری همدوسی شباهت تفاضلی معین و شباهت تفاضلی خودران با قدرت تفکیک زیاد معرفی می‌شود که

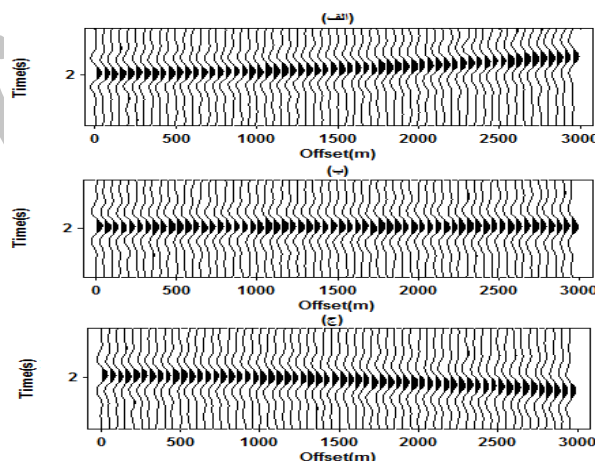
یک روش تولید عدد تصادفی است که برای برآورد ویژگی‌های آماری داده اولیه از قبیل میانگین، واریانس و بازه اطمینان، نیازمند نمونه‌برداری دوباره از داده اولیه است (افرون، ۱۹۷۹). این روش برای تولید مجموعه داده‌های جدید با طول یکسان، اما با ویژگی آماری متفاوت که در آنها داده‌های ورودی به صورت تصادفی دسته‌بندی شده‌اند از تعداد زیادی الگوریتم‌های شبیه‌سازی استفاده می‌کند. خودرانی شبیه روش‌های جک نایف، بیسین و متروپولیس است با این تفاوت که خودرانی نیازمند اطلاعات اضافی در مورد خود نمونه‌های داده اولیه نیست.

یک سری زمانی گسسته با طول  $n$   $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  را در نظر بگیرید. با اجرای خودرانی روی این سری، یک سری زمانی جدید تولید می‌شود که طول آن برابر با سری اولیه است اما نمونه‌های آن به طور کاملاً تصادفی کنار هم قرار می‌گیرند. بنابراین خودرانی دسته‌بندی اولیه در سری زمانی داده شده را عوض می‌کند. با استفاده از الگوریتم‌های منظم‌سازی تصادفی احتمال تشکیل تعداد بسیار زیادی سری زمانی مستقل از داده اولیه وجود دارد.

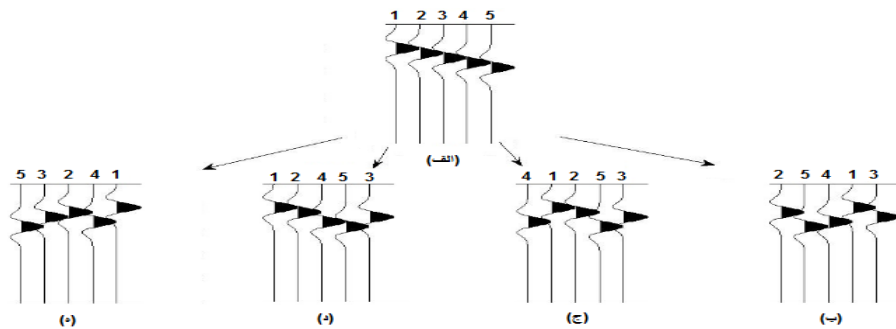
سرعت‌های ۲۹۵۰، ۳۰۰۰، ۳۰۵۰ متر بر ثانیه سه پنجره زمانی تولید شده است. اگر به شکل‌ها توجه شود خصوصیات پنجره‌های زمانی تولید شده تا دورافت حدود ۲ هزار متر، بسیار شبیه به هم هستند. بنابراین اگر ثبت، فاقد دورافت‌های دور باشد، تمایز پارامترهای برون‌راند را برای سه سرعت به کار رفته مشکل می‌کند. در این موارد حتی اگر فاصله سرعت‌های فرضی خیلی نزدیک به هم باشد، پی بردن به پارامترهای دقیق برون‌راند رویداد بازتابی با روش‌های اندازه‌گیری همدوسی مرسوم دشوار می‌شود. در این مقاله روش‌های جدیدی معرفی می‌شود که می‌تواند پارامترهای برون‌راندی را که با ویژگی‌های مشابهی در یک پنجره زمان تولید می‌شوند، متمایز کنند. این روش‌ها براساس ضریب شباهت تفاضلی بهنجار خودران (عباد و همکاران، ۲۰۱۲) بنا شده‌اند.

### ۳ خودرانی و جایگزینی

به‌طور کلی به روش‌های تولید عدد تصادفی از یک داده اولیه (بسته به نوع مسئله: عدد، بردار و یا ماتریس) که تابع چگالی احتمال آنها نامعلوم یا برآوردشان مشکل است، روش مونت کارلو گفته می‌شود (جیمز، ۲۰۰۳). خودرانی



شکل ۱. حساسیت منحنی برون‌راند به تغییرات کوچک سرعت، (الف) پنجره زمانی ساخته شده حول منحنی برون‌راند با سرعت ۲۹۵۰ متر بر ثانیه، (ب) پنجره زمانی ساخته شده حول منحنی برون‌راند با سرعت ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و (ج) پنجره زمانی ساخته شده حول منحنی برون‌راند با سرعت ۳۰۵۰ متر بر ثانیه.



شکل ۲. عمل خودرانی بروی یک دسته ردلرزه، (الف) مجموعه اولیه شامل پنج ردلرزه حاوی یک رویداد خطی، نتیجه چهار بار عمل خودرانی روی دسته اولیه در شکل‌های (ب)، (ج)، (د) و (ه) نشان داده شده است. رویداد خطی در مجموعه اولیه در اثر خودرانی، با جابه‌جایی‌های زمانی بزرگ‌تر بین ردلرزه‌های مجاور جایگزین شده است.

چهار نتیجه خودرانی (بدون جایگزینی) روی مجموعه اولیه، نشان داده شده است. در نتیجه این عمل رفتار خطی منحنی برون‌راند شکسته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف زمانی بین ردلرزه‌های مجاور در شکل ۲-الف ناچیز است. اما در نتیجه عمل خودرانی، اختلاف زمانی بین ردلرزه‌ها بسیار بیشتر از حالت اولیه شده است (شکل‌های ۲-ب، ۲-ج، ۲-د، و ۲-ه). در این مقاله از "خودرانی بدون جایگزینی" برای دوباره نمونه برداری تصادفی از ردلرزه‌های موجود در پنجره زمان (درحکم ورودی)، بدون تکرار اطلاعات دورافت (در خروجی)، استفاده می‌شود.

#### ۴ شباهت تفاضلی

برای داده لرزه‌ای در حوزه زمان - دورافت، شباهت تفاضلی به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (برندسبرگ و همکاران، ۲۰۰۳):

$$DS = \int_x dx \int_t dt \left( \frac{\partial(d(t,x))}{\partial x} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن،  $t$  زمان،  $x$  دورافت و  $d(t,x)$  دامنه داده لرزه‌ای در زمان  $t$  و دورافت  $x$  است.

برای نشان دادن بازتاب‌های ضعیف در طیف، باید با مقیاس کردن ضریب شباهت تفاضلی نسبت به کل انرژی

"خودرانی با جایگزینی"، یک نوع دوباره نمونه‌برداری تصادفی از سری زمانی مورد بررسی است که امکان تکرار نمونه‌ها را در سری زمانی جدید ممکن می‌کند. در این حالت هر نمونه خارج شده از داده اولیه برای تولید یک نمونه در سری زمانی جدید، قبل از بیرون کشیدن نمونه جدید، سر جای خودش (در سری اولیه) قرار می‌گیرد. این فرایند احتمال قرارگیری یک نمونه را در سری زمانی جدید برای بیشتر از یک بار فراهم می‌کند؛ یا ممکن است که یک نمونه در داده اولیه باشد اما در سری زمانی جدید نباشد. تعداد کل سری‌های زمانی محتمل را که می‌توان از خودرانی با جایگزینی، برای یک سری زمانی ورودی با طول  $n$  به دست آورد، برابر با  $n^n$  است.

"خودرانی بدون جایگزینی"، یک نگاهت یک‌به‌یک با تناظر یک‌به‌یک بین سری ورودی و خروجی است که در آن همه نمونه‌های سری اولیه فقط با یک تکرار در سری خروجی ظاهر می‌شوند. بنابراین، امکان تکرار نمونه‌ها در سری خروجی وجود ندارد. در این حالت تعداد سری‌های ممکن تولید شده از سری اولیه با طول  $n$  برابر  $n!$  است.

شکل ۲ مجموعه‌ای از پنج ردلرزه را که شامل یک رویداد با برون‌راند خطی است نشان می‌دهد. در زیر آن،

که در آن،  $\bar{x}_i \{i = 1, N\}$  سری خودران شده از آرایش دورافت  $X_i \{i = 1, N\}$  ردلرزه‌های داخل پنجره زمان است.

تحت این تعریف، ضریب BDS مثبت است و در گستره  $[0-1]$  تغییر می‌کند. معادله (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$BDS = (1 - D)S \quad (۵)$$

که در آن،  $D$  ضریب شباهت تفاضلی بهنجار است و وقتی که رویداد به طور افقی در مرکز پنجره قرار گرفته باشد، مقدارش حداقل می‌شود. همچنین  $S$  ضریب شباهت است که طبق رابطه (۱) برای یک رویداد کاملاً افقی شده در مرکز پنجره زمانی، باید بیشینه شود. هدف از مقیاس کردن با ضریب شباهت  $S$  در معادله (۵)، میرا کردن مقادیر زیاد هم‌دوسی جمله  $(1-D)$  است وقتی که پنجره زمان فقط شامل نوفه باشد. شایان ذکر است که عوض کردن ترتیب ردلرزه‌ها (اجرای خودرانی) تاثیری در مقدار  $S$  ندارد. چون جمع یک عملگر، جابه‌جایی‌پذیر است. در مقابل ضریب شباهت تفاضلی  $D$  ظاهر شده در معادله (۵) به دسته‌بندی ردلرزه‌ها احساس است، چون دارای علامت منها بوده و جابه‌جایی‌پذیر هم نیست و برای هر دسته‌بندی متفاوت از آرایش دورافت  $X_i$  مقادیر متفاوتی را نتیجه می‌دهد.

برای ارزیابی مقادیر ضریب BDS در حالت‌های مختلف صورت معادله (۳) را بسط می‌دهیم که بسط آن به صورت رابطه (۶) خواهد شد.

$$D = \quad (۶)$$

$$\frac{N \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} [ \sum_{i=2}^N d(t, \bar{x}_i)^2 - 2 \sum_{i=2}^N d(t, \bar{x}_i) d(t, \bar{x}_{i-1}) + \sum_{i=2}^N d(t, \bar{x}_{i-1})^2 ]}{4(N-1) \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2}$$

با به کارگیری نامسای کوشی - شوارتس رابطه (۷) را به دست می‌آوریم.

داخل پنجره یک فاکتور بهنجارش معرفی شود. بنابراین برای داده لرزه‌ای گسسته در فضا و زمان، ضریب شباهت جزئی بهنجارش شده به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (عباد و همکاران، ۲۰۰۹):

$$D = \frac{N \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=2}^N [d(t, \bar{x}_i) - d(t, \bar{x}_{i-1})]^2}{4(N-1) \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2} \quad (۳)$$

که در آن،  $N$  تعداد کل ردلرزه‌های داخل پنجره زمان،  $W$  پهنای پنجره زمان و  $1$  شمارنده ردلرزه‌ها است.

در غیاب نوفه و تغییرات دامنه و فاز برای داده‌های موجود در پنجره انتخابی، برای رویدادی که به صورت کاملاً افقی در مرکز پنجره قرار گرفته، ضریب شباهت تفاضلی دقیقاً برابر صفر می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود برای رویداد افقی مقدار این شیوه اندازه‌گیری هم‌دوسی، برای پارامترهای انتخاب شده مناسب برون‌راند، کمینه می‌شود. هرگاه پارامترهای فرضی برون‌راند به سرعت واقعی نزدیک باشد، آنها پنجره‌های زمانی تقریباً افقی را نتیجه می‌دهند، و شباهت تفاضلی یک ناحیه پهن با مقادیر نزدیک به صفر را نتیجه می‌دهد. به کاربرد خودرانی، حساسیت نسبت به انحراف‌های اندک از افقی بودن را افزایش می‌دهد و جابه‌جایی‌های زمانی ناچیز بین موجک‌های بازتابی داخل پنجره را نمایان می‌سازد. بنابراین استفاده از خودرانی منجر به تشخیص بهتر پارامترهای بازتاب می‌شود.

ضریب شباهت تفاضلی خودران (BDS) به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (عباد و همکاران، ۲۰۰۹):

$$BDS = \left[ 1 - \frac{N \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=2}^N [d(t, \bar{x}_i) - d(t, \bar{x}_{i-1})]^2}{4(N-1) \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2} \right] \times \frac{\sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} (\sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i))^2}{N \sum_{t=t_0-w/2}^{t_0+w/2} \sum_{i=1}^N d(t, \bar{x}_i)^2} \quad (۴)$$

BDS بزرگ‌تر یا مساوی با حالت عادی چینش ردلرزه‌ها در ثبت نقطه میانی مشترک است. خودرانی فقط مقدار شباهت تفاضلی بهنجار شده  $D$  را که به نحوه دسته‌بندی ردلرزه‌ها حساس است، تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۳-الف یک پنجره زمانی حاوی یک رویداد را که برآورد خوبی از پارامترهای برون‌راند آن شده، نشان می‌دهد. به‌کارگیری رابطه (۵) برای ردلرزه‌های شکل ۳-الف مقادیر بزرگ  $D$  را تولید می‌کند و در نتیجه، مقدار BDS کوچک خواهد شد. شکل ۳-ب نتیجه اجرای خودرانی را روی پنجره زمانی شکل ۳-الف نشان می‌دهد. بعضی از نتایج دسته‌بندی تصادفی، به‌طور موثری جابه‌جایی‌های موجک بین ردلرزه‌های درون پنجره زمانی را برجسته می‌کند. از این‌رو این دسته بندی با تمایز در بین چندین سرعت برون‌راندی که مقادیر زیاد شباهت تولید می‌کنند، در طیف BDS، مقدار قدرت تفکیک بیشتری را فراهم می‌کند. اما همیشه یک خودرانی ساده، موجک‌های با بیشترین اختلاف زمانی را کنار هم قرار نمی‌دهد. برای کنار هم قرار گرفتن موجک‌های با بیشترین اختلاف زمانی، دو راه حل عرضه شده است که در ادامه شرح داده می‌شوند.

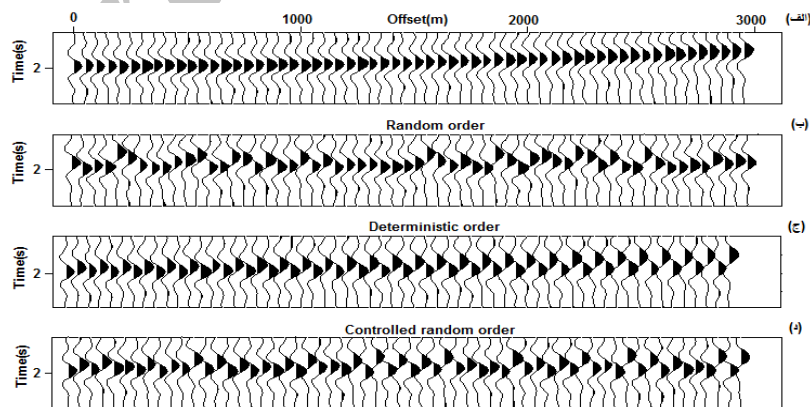
$$|\sum_{i=2}^N d(t, \bar{x}_i) d(t, \bar{x}_{i-1})| \leq \quad (7)$$

$[\sum_{i=2}^N d(t, \bar{x}_i)^2 \sum_{i=2}^{N-1} d(t, \bar{x}_i)^2]^{\frac{1}{2}}$   
در دو حالت زیر دو طرف نامساوی رابطه (۷) برابر می‌شوند:

(۱) اگر داخل پنجره زمان دامنه هر ردلرزه با ردلرزه مجاور برابر باشد  $d(t, \bar{x}_i) = d(t, \bar{x}_{i-1}) = s(t), i = 2, \dots, N$  این حالت وقتی اتفاق می‌افتد که پنجره زمانی فاقد نوفه و موجک مستقل از دورافت و کاملاً به خط شده باشد. برای این حالت  $D=0$  و  $S=1$  در نتیجه BDS=1 خواهد شد.

(۲) هنگامی که داخل پنجره زمان دامنه هر ردلرزه قرینه ردلرزه مجاور باشد  $d(t, \bar{x}_i) = -d(t, \bar{x}_{i-1}) = s(t)$  در این حالت (برای تعداد ردلرزه‌های زوج)،  $D=1$  و  $S=0$  خواهد شد در نتیجه BDS=0 می‌شود. شبیه این حالت در داده واقعی بسیار کم اتفاق می‌افتد. زیرا تغییرات دامنه با دورافت تدریجی است و فقط می‌تواند برای داده‌ای ایجاد شود که در وسط گسترش به‌طور ناگهانی قطبیدگی آن معکوس شود. در سایر حالات  $0 < D \leq 1$  و  $0 < S \leq 1$  در نتیجه  $0 \leq BDS \leq 1$ .

برای دسته‌بندی‌های متفاوت ردلرزه‌های ثبت نقطه میانی مشترک حاصل از اجرای خودرانی، مقدار ضریب



شکل ۳. خودرانی و چینش معین ردلرزه‌های داخل پنجره زمان، (الف) پنجره زمان اولیه با چینش ردلرزه‌ها برحسب افزایش دورافت، (ب) پنجره زمان اولیه بعد از خودرانی، (ج) پنجره زمان بعد از مرتب‌سازی معین و (د) پنجره اولیه بعد از خودرانی کنترل شده که ردلرزه‌های با دورافت‌های نزدیک دور را به‌طور کاملاً تصادفی به‌صورت تناوبی کنار هم قرار می‌دهد.

$$BDS_r = (1 - D_1)(1 - D_2) \dots (1 - D_r)S \quad (۸)$$

مقدار این برآوردگر همیشه در گستره [۰-۱] تغییر می‌کند  $0 \leq BDS_r \leq 1$ . اما قدرت تفکیک بیشتری نسبت به برآوردگر تعریف شده در معادله (۵) تولید می‌کند، زیرا استفاده از نتایج خودرانی بیشتر احتمال قرارگیری کنار هم ردلرزه‌های با اختلاف زمانی زیاد را بیشتر می‌کند. این ضریب شامل  $r$  نتیجه از دسته‌بندی تصادفی (حاصل از خودرانی) آرایش  $\bar{x}$  برای محاسبه تعداد مشابهی از ضریب‌های شباهت تفاضلی بهنجار شده است. قدرت تفکیک این روش اندازه‌گیری جدید همدوسی با افزایش تعداد نتایج  $r$  که ردلرزه‌های با دورافت نزدیک و دور به روشی کاملاً تصادفی در آرایش  $\bar{x}$  عوض می‌شوند، افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب  $S$  فقط یک‌بار در رابطه برآوردگر جدید ظاهر شده است، چون این ضریب به نوع دسته‌بندی ردلرزه‌ها حساس نیست.

#### ۵ هزینه محاسباتی

تعداد عملیات موردنیاز برای محاسبه ضریب شباهت در رابطه (۱)، برای یک پنجره زمانی شامل  $N$  ردلرزه با پهنای  $w = k\Delta T$ ، حدود  $3KN$  است که در آن  $\Delta T$  فاصله نمونه‌برداری است و  $K$  تعداد نمونه‌های زمانی موجود در پنجره زمان است. حجم محاسبات موردنیاز برای همین پنجره زمانی با ضریب  $BDS$  حدود  $5KN$  عملیات است. بنابراین استفاده از روش  $BDS$ ، هزینه‌ای حدود  $1/7$  برابر روش ضریب شباهت نیاز دارد. همچنین یک هزینه اضافی برای خودرانی آرایش ردلرزه‌های ورودی نیز موردنیاز است. این هزینه از مرتبه حدود  $N^2$  عملیات و بسیار پُرهزینه‌تر از محاسبه خود برآوردگر  $BDS$  است. زیرا تعداد ردلرزه‌های موجود در داده لرزه‌ای بسیار بیشتر از تعداد نمونه‌های زمانی موجود در یک پنجره زمانی است

#### ۱-۴ BDS معین

یک دسته از ردلرزه‌ها با تعداد زوج را در نظر بگیرید ( $N=2m$ ). بازچینی معین ردلرزه‌ها که قدرت تفکیک بیشتری را در معادله (۵) نسبت به خودرانی ساده فراهم می‌کند به صورت  $\bar{x} = \{x_1, x_{m+1}, x_2, x_{m+2}, \dots, x_k, x_{m+k}, \dots, x_m, x_N\}$  تعریف می‌شود.

در این ایده ردلرزه‌های با دورافت نزدیک و دور، برای تشکیل آرایش  $\bar{x}$  به صورت تناوبی کنارهم قرار می‌گیرند. این روش تفاوت‌های برون‌راند بین ردلرزه‌های آرایش جدید را به صورت دوجه دو تضمین می‌کند. به کار بردن این روش روی پنجره زمانی شکل ۳-الف در شکل ۳-ج نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این روش، جابه‌جایی‌های زمان رسید را بهتر از یک خودرانی ساده نشان می‌دهد. این آرایش جدید (دسته‌بندی معین) را می‌توان با اعمال یک شرط اضافی، از راه خودرانی تولید کرد. به این صورت که ردلرزه‌های با اندیس فرد  $k=1, 3, \dots, 2m-1$  متعلق به دورافت‌های نزدیک، و اندیس‌های  $k=2, 4, \dots, 2m$  مربوط به ردلرزه‌های با دورافت دور باشند این نوع دسته‌بندی، منظم‌سازی خودران کنترل شده نامیده می‌شود. یک مثال از این نوع چینش در شکل ۳-د نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که ضریب شباهت ( $S$ ) برای هر چهار پنجره نشان داده شده در شکل ۳ یکسان است و فقط صورت رابطه شباهت تفاضلی بهنجار است که با دسته‌بندی متفاوت ردلرزه‌ها تغییر می‌کند.

#### ۲-۴ BDS با قدرت تفکیک زیاد

روش دیگری را برای اندازه‌گیری همدوسی با قدرت تفکیک زیاد می‌توان تعریف کرد که شامل نتیجه اعمال چندین بار خودرانی کنترل شده برای محاسبه ضریب زیر باشد:

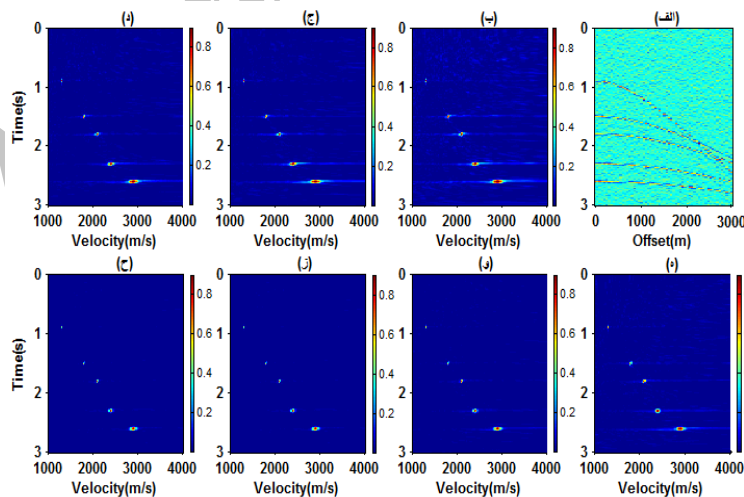


مقاطع اند نشان داده شده است. طیف سرعت با استفاده از ضریب شباهت ۴-ب، BDS با دسته‌بندی ردلرزه‌ها برحسب افزایش دورافت ۴-ج، BDS با خودرانی ساده ردلرزه‌ها ۴-د، BDS معین ۴-ه، و در شکل‌های ۴-و، ۴-ز، و ۴-ح BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $t=2$ ،  $t=3$ ،  $t=4$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قدرت تفکیک در BDS با دسته‌بندی ردلرزه‌ها برحسب افزایش دورافت، نسبت به ضریب شباهت بهتر شده است. هنگامیکه از معادله (۵) برای ساختن طیف سرعت استفاده می‌شود، دسته‌بندی تصادفی ردلرزه‌ها داخل پنجره زمانی، قدرت تفکیک بیشتری را در طیف سرعت فراهم می‌آورد. با استفاده از دسته‌بندی معین ردلرزه‌ها، معادله (۵) قدرت تفکیک بیشتری را نسبت به دو روش قبلی، در شکل ۴-ه فراهم آورده است. قدرت تفکیک بیشتر در طیف سرعت را می‌توان با استفاده از جمله‌های بیشتر در رابطه (۸) به دست آورد. چنانچه ملاحظه می‌شود در شکل‌های ۴-و، ۴-ز، و ۴-ح، با افزایش  $t$  از ابهام (پهن‌شدگی) در پیک‌های سرعت، به‌خصوص در انتهای مقطع کاسته شده است.

$(N \geq K)$ . از آنجا که در BDS معین، فقط از یک‌بار عمل خودرانی استفاده می‌شود این هزینه قابل صرف‌نظر است و برای BDS با قدرت تفکیک زیاد، این هزینه با افزایش تعداد جملات، افزایش می‌یابد.

## ۶ ارزیابی روش‌ها با اعمال روی داده‌های مصنوعی و واقعی

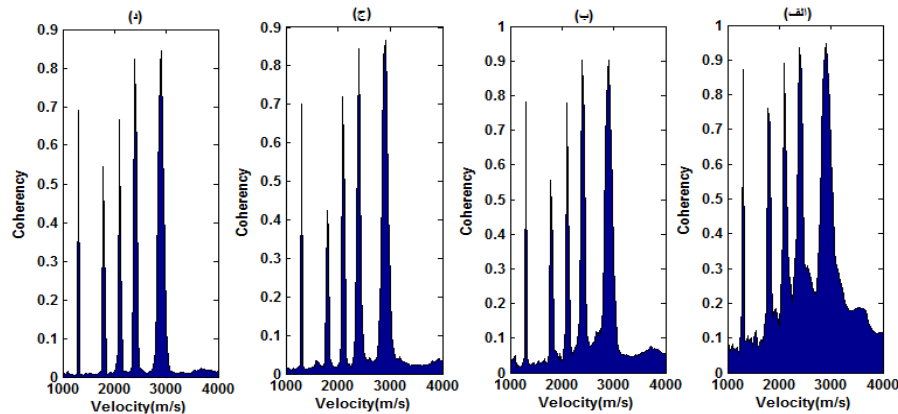
به منظور بررسی توانمندی روش‌های عرضه شده در این تحقیق، این روش‌ها روی یک ثبت مصنوعی حاوی رویدادهای متقاطع با نوفه و بدون نوفه (با مشخصات ذکر شده در جدول ۱) و ثبتی دیگر با رویدادهای نزدیک به هم (لایه‌های نازک) در انتهای ثبت (با مشخصات ذکر شده در جدول ۲) اعمال، و نتایج به دست آمده، با روش ضریب شباهت مقایسه شده است که به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۶ نمایش داده شده است. برای ساخت ثبت‌های مصنوعی از موجک ریکر با بسامد غالب ۴۰ هرتز و فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه استفاده شده است و نوفه اضافه شده به ثبت‌ها نوفه تصادفی باند محدود است. در شکل ۴-الف ثبتی با پنج رویداد که سه تا از آنها



شکل ۴. نمایش طیف سرعت با اعمال برآوردگرهای متفاوت همدوسی روی یک داده مصنوعی، (الف) یک ثبت مصنوعی شامل پنج رویداد با سه رویداد متقاطع، (ب) ضریب شباهت، (ج) BDS با دسته‌بندی برحسب افزایش دورافت، (د) BDS با خودرانی ساده، (ه) BDS معین و (و)، (ز)، و (ح) BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $t=2$ ،  $t=3$ ، و  $t=4$  هستند. مقیاس رنگ بیانگر مقدار ضریب شباهت است.

جدول ۱. زمان‌ها و سرعت‌های تشکیل دهنده هذلولی‌های داده مصنوعی شکل‌های ۴-الف و ۶-ب.

$T_0$ (s)	0.8	1.5	1.8	2.3	2.6
V(m/s)	1300	1800	2100	2400	2900

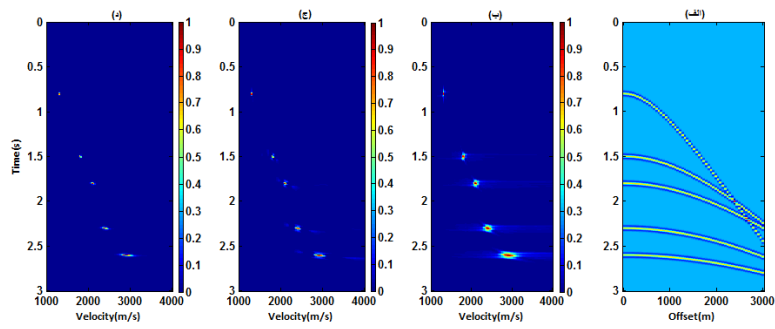


شکل ۵. نمایش سرعت برحسب مقدار همدوسی، به ترتیب برای شکل‌های ۴-ب، ۴-د، ۴-و، و ۴-ز.

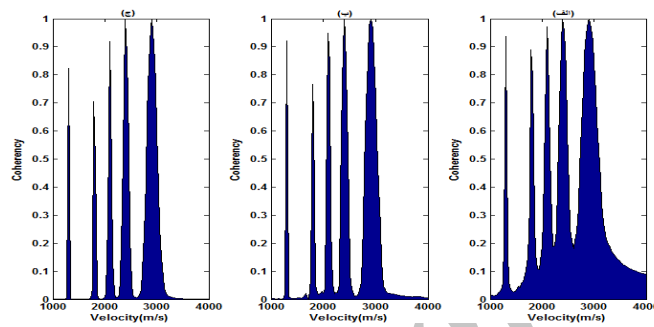
روش‌ها). این کاهش همدوسی با افزایش تعداد جملات روش BDS با قدرت تفکیک زیاد، بیشتر می‌شود و این موجب محدودیت در به کار بردن تعداد جملات بیشتر برای دستیابی به افزایش قدرت تفکیک بیشتر در روش BDS با قدرت تفکیک زیاد می‌شود. بنابراین به خاطر افزایش هزینه و کاهش میزان همدوسی خصوصاً برای مناطق کم عمق میزان  $T$  نباید بزرگ انتخاب شود ( $T$  بین ۲ و ۴). در شکل ۸-الف ثبتی با لایه‌های نزدیک به هم در زمان رسیدهای دیرتر نشان داده شده است و نتایج اعمال روش‌های BDS معین و BDS با قدرت تفکیک زیاد روی این ثبت، با روش ضریب شباهت مقایسه شده است. در شکل ۱۰ طیف سرعت به ترتیب با استفاده از روش‌های ضریب شباهت، BDS معین و BDS با قدرت تفکیک زیاد برای ثبت نقطه میانی مشترک واقعی شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش در قدرت تفکیک در زمان حدود ۱/۳ ثانیه و رویدادهای آخر طیف BDS معین و BDS با قدرت تفکیک زیاد کاملاً مشهود است.

برای بهتر نشان دادن بهبود حاصل شده در قدرت تفکیک با روش‌های عرضه شده، در شکل ۵ سرعت برحسب همدوسی به ترتیب برای ضریب شباهت، BDS معین و BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $t=3$ ، نمایش داده شده است.

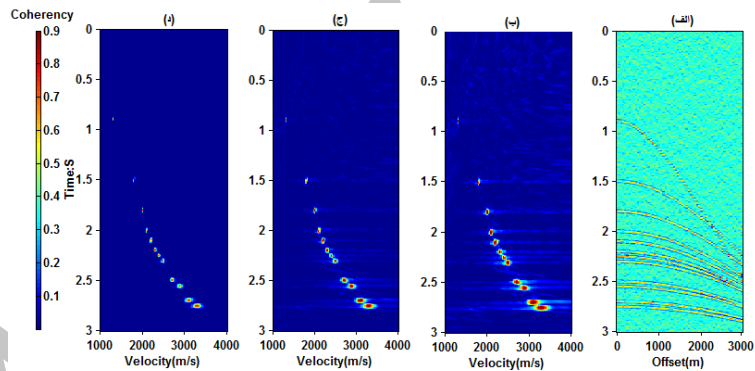
شکل ۶-الف ثبت نقطه میانی مشترک مصنوعی بدون نوفه شکل ۴-الف است و نتایج حاصل از اعمال روش ضریب شباهت بر آن در شکل ۶-ب، روش BDS معین در شکل ۶-ج و روش BDS با قدرت تفکیک زیاد در شکل ۶-د نشان داده شده است. در شکل ۷ برای طیف‌های سرعت شکل ۶ سرعت برحسب همدوسی به ترتیب رسم شده است. از مقایسه نتایج شکل ۵ و شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سطح نوفه اثر بیشتری در کاهش میزان همدوسی روش‌های BDS معین و به خصوص BDS با قدرت تفکیک زیاد نسبت به ضریب شباهت دارد، زیرا در این روش‌ها دو یا چند مقدار بین صفر و یک در هم ضرب می‌شوند (با توجه به رابطه این



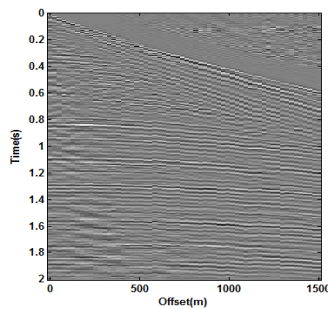
شکل ۶. نمایش طیف سرعت برای مدل مصنوعی بدون نوفه شکل ۴-الف، (الف) ثبت مصنوعی بدون نوفه، (ب) طیف سرعت ضریب شباهت، (ج) طیف سرعت روش BDS معین و (د) طیف سرعت BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $I=3$ . مقیاس رنگ بیانگر مقدار ضریب شباهت است.



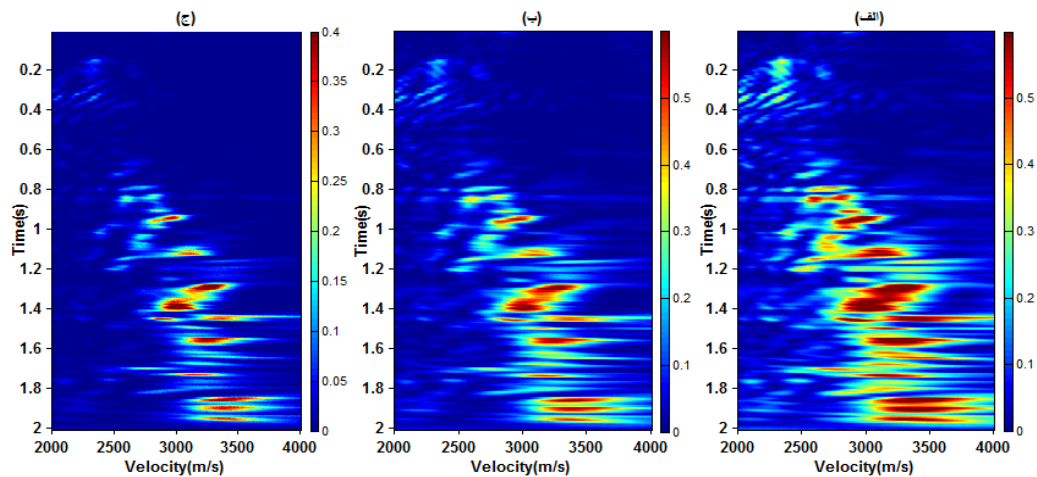
شکل ۷. نمایش سرعت برحسب مقدار هم‌دوسی، به ترتیب برای شکل‌های ۶-ب، ۶-ج و ۶-د.



شکل ۸. نمایش طیف سرعت برای ثبتی با لایه‌های نزدیک به هم، (الف) ثبت مصنوعی نقطه میانی مشترک با رویدادهای نزدیک به هم در اواخر زمان آن، (ب) طیف ضریب شباهت، (ج) BDS معین و (د) BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $I=3$ . مقیاس رنگ بیانگر مقدار ضریب شباهت است.



شکل ۹. یک ثبت نقطه میانی مشترک واقعی.



شکل ۱۰. نمایش طیف سرعت برای مقطع شکل ۷، (الف) طیف روش ضریب شباهت، (ب) طیف BDS معین و (ج) طیف BDS با قدرت تفکیک زیاد برای  $t=3$ . مقیاس رنگ بیانگر مقدار ضریب شباهت است.

جدول ۲. زمان‌ها و سرعت‌های تشکیل‌دهنده هذلولی‌های داده مصنوعی شکل ۸-الف.

$T_0$ (s)	0.9	1.5	1.8	2	2.1	2.2	2.25	2.3	2.5	2.55	2.7	2.75
V(m/s)	1300	1800	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2700	2800	3000	3100

## ۷ نتیجه‌گیری

جانشین خوب برای روش ضریب شباهت و گزینه‌ای به‌صرفه در مقایسه با سایر برآوردگرهای با قدرت تفکیک زیاد از قبیل روش ویژه‌ساختار برای برآورد پارامترهای برون‌راند (سرعت و زمان دورافت- صفر) در داده‌های با مرتبه پوشش زیاد باشند. امتیازات پیش‌گفته برای روش‌های پیشنهادی روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی نشان داده شده است.

در این مقاله دو روش اندازه‌گیری همدوسی بر پایه ضریب شباهت تفاضلی به‌نجار معرفی شده است. این روش‌ها از روش خودرانی، برای افزایش قدرت تفکیک در جمله صورت رابطه شباهت تفاضلی، استفاده می‌کنند. روش BDS معین با چینش ردلرزه‌های با دورافت نزدیک و دور به‌طور تناوبی در پنجره زمانی، قدرت تفکیک بیشتری را از یک خودرانی ساده برای دسته‌بندی ردلرزه‌های داده، تولید می‌کند. و روش BDS با قدرت تفکیک زیاد، با استفاده از چندین نتیجه خودرانی کنترل شده، قدرت تفکیک بسیار بیشتری را نسبت به ضریب شباهت فراهم می‌آورد.

از آنجا که روش‌های عرضه شده، در ساختن طیف سرعت دارای قدرت تفکیک زیاد، خصوصاً برای رویدادهای عمیق و دارای هزینه‌ای قابل‌مقایسه با روش شباهت متداول هستند، این روش‌ها می‌توانند به‌منزله یک

## مراجع

- Abbad, B. and Ursin, B., 2012, High-resolution bootstrapped differential semblance, *Geophysics*, **77**(3), U39-U47.
- Abbad, B., Ursin, B. and Rappin, D., 2009, Automatic nonhyperbolic velocity analysis: *Geophysics*, **74**(2), U1-U12.
- Biondi, B. L. and Kostov, C., 1989, High-resolution velocity spectra using eigenstructure methods, *Geophysics*, **54**, 832-842.
- Brandsberg-Dahl, S., Ursin, B. and de Hoop, M. V., 2003, Seismic velocity analysis in the

- 72(2), U11-U19.
- Sacchi, M. D., 1998, A bootstrap procedure for high-resolution velocity analysis, *Geophysics*, **63**, 1716-1725.
- Schneider, W. A. and Backus, M. M., 1968, Dynamic correlation analysis, *Geophysics*, **33**, 105-126.
- Sherwood, J. W. and Poe, P. H., 1972, Continuous velocity estimation and seismic wavelet processing, *Geophysics*, **37**, 769-787.
- Symes, W. W. and Carazzone, J. J., 1991, Velocity inversion by differential semblance optimization, *Geophysics*, **56**, 654-663.
- Taner, M. T. and Koehler, F., 1969, Velocity spectra- Digital computer derivation and application of velocity functions, *Geophysics*, **34**, 859-881.
- scattering-angle/azimuth domain, *Geophysical Prospecting*, **51**, 295-314.
- Efron, B., 1979, Bootstrap methods: Another look at the jackknife, *Annals of Statistics*, **7**, 1-26.
- Fuller, B. and Kirlin, R. L., 1992, Weighted correlation pairs for improved velocity analysis, 62<sup>nd</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 1221-1222.
- James, E. A., 2003, Random number generation & Monte Carlo methods, Springer science business media, Inc.
- Key, S. C. and Smithson, S. B., 1990, New approach to seismic-reflection event detection and velocity determination, *Geophysics*, **55**, 1057-1069.
- Larner, K. and Celis, V., 2007, Selective correlation velocity analysis, *Geophysics*,

Archive of SID