

بهبود نشانگر لرزه‌ای ساختار ویژه در شناسایی ناپیوستگی‌های لرزه‌ای با استفاده از بردارهای ویژه

محمدرضا موسوی نژاد^۱، امین روشندل کاهو^{۲*}، محمدرداد^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: roshandel@shahroodut.ac.ir

چکیده

در داده‌های لرزه‌ای، حضور گسل‌ها معمولاً با ایجاد ناپیوستگی در الگوی پیوسته‌ی بازتاب‌ها همراه است. با این حال، به دلایل مختلفی مانند تأثیر مخرب نوفه و دشواری‌های ناشی از شناسایی بصری، روش‌های سنتی شناسایی گسل‌ها با محدودیت‌هایی همراه هستند. به همین منظور، امروزه از نشانگرهای لرزه‌ای به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت تسهیل در شناسایی و اکتشاف گسل در داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. انواع مختلف نشانگرهای لرزه‌ای برای شناسایی ناپیوستگی‌های لرزه‌ای معرفی شده‌اند که نشانگر همدوسی یکی از رایج‌ترین آن‌ها است. معیارهای مختلفی برای محاسبه نشانگر همدوسی در داده لرزه‌ای وجود دارد که دو معیار شباهت و ساختار ویژه از پرکاربردترین و متداول‌ترین آن‌ها هستند. معیار ساختار ویژه که دارای دقت و قدرت تفکیک بالاتری نسبت به معیار شباهت است، از مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس پنجره تحلیل که به تغییر انرژی حساس هستند، استفاده می‌کند. به همین دلیل، این معیار در شناسایی ناپیوستگی‌هایی که تغییر شکل موج در آن‌ها رخ می‌دهد، ناتوان است. به همین منظور، در این مقاله یک نشانگر همدوسی جدید مبتنی بر استفاده همزمان از بردارها و مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس معرفی شده است. افزوده شدن این مؤلفه، حساسیت روش را نسبت به تغییرات شکل و قطبش افزایش داده، در حالی که روش ساختار ویژه متداول عمده‌تاً نسبت به تغییرات انرژی حساسیت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از ارزیابی نشانگر پیشنهادی روی داده‌های مصنوعی و واقعی نشان می‌دهد که این روش در شناسایی ناپیوستگی‌ها به خصوص ناپیوستگی‌هایی که فقط سبب تغییر شکل موج و تغییر قطبش شده‌اند، در مقایسه با روش‌های مبتنی بر شباهت و ساختار ویژه متداول، قدرت تفکیک‌پذیری بالاتری را ارائه می‌دهد. همچنین، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که نشانگر همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه بهبودیافته، در شرایط وجود نوفه تصادفی با سطوح مختلف نوفه دارای پایداری قابل قبولی است. این ویژگی‌ها، روش پیشنهادی را به ابزاری کارآمدتر برای شناسایی گسل و ناپیوستگی‌ها در داده‌های لرزه‌ای تبدیل می‌کند.

واژگان کلیدی

ناپیوستگی لرزه‌ای

گسل

نشانگر لرزه‌ای

همدوسی

شباهت

ساختار ویژه

مقدار ویژه

بردار ویژه

۱- مقدمه

ناپیوستگی‌های لرزه‌ای، مکان‌هایی در زمین هستند که در آن‌ها به دلیل تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی، امواج لرزه‌ای رفتار غیرعادی از خود نشان می‌دهند و پیوستگی آن‌ها کاهش می‌یابد. ناپیوستگی‌های لرزه‌ای مانند ترک، شکستگی، کانال، گسل و دودکش‌های گازی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی و ژئومکانیکی مخزن مانند تخلخل، تراوایی و مقاومت سنگ داشته باشند. بنابراین، شناسایی و تعیین دقیق ناپیوستگی‌ها برای اکتشاف و استخراج نفت و گاز بسیار مهم است (Suppe, 1985; Talebi et al., 2023).

شناسایی ناپیوستگی‌ها در داده‌های لرزه‌ای همواره چالش بزرگی برای مفسران بوده است. ناپیوستگی‌ها با ایجاد جابجایی در بازتاب‌ها، باعث تغییرات ناگهانی در دامنه و شکل امواج لرزه‌ای می‌شوند و از این طریق خود را در مقطع لرزه‌ای آشکار می‌کنند (Bahorich and Farmer, 1995; Taner, 2001).

نشانگرهای لرزه‌ای، ابزارهایی هستند که اطلاعات نهفته در داده‌های لرزه‌ای را آشکار می‌کنند و امکان تفسیر کمی را برای مفسر لرزه‌نگاری فراهم می‌آورند. آن‌ها با افزایش کیفیت و کمیت داده‌های لرزه‌ای، به شناسایی رویدادهای زمین‌شناسی مختلف درون داده‌های لرزه‌ای بازتابی کمک می‌کنند (Chopra and Marfurt, 2007). استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان یک راهکار مؤثر برای افزایش دقت و سرعت در شناسایی ناپیوستگی‌های لرزه‌ای پیشنهاد شده است. ناپیوستگی‌ها معمولاً با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای مختلف مانند همدوسی، تشابه، واریانس، انحناء، شیب، آزیموت و لبه‌یابی شناسایی می‌شوند که تحت عنوان نشانگرهای ناپیوستگی لرزه‌ای از مهم‌ترین نشانگرهای زمین‌شناسی هستند (Barnes, 2016). نشانگرهای لرزه‌ای همدوسی به دلیل دقت بالا و تفکیک‌پذیری بهتر در شناسایی ناپیوستگی‌ها کاربرد بیشتری دارند. نشانگر همدوسی را می‌توان با استفاده از رویکردهای مختلفی از جمله همبستگی متقابل، شباهت، واریانس، ساختار ویژه، تانسور ساختار گرادیان و کمترین مربعات محاسبه کرد (Chopra and Marfurt, 2007). یکی از متداول‌ترین رویکردهای محاسبه نشانگر لرزه‌ای همدوسی، رویکرد ساختار ویژه است که به دلیل دقت و قدرت تفکیک و همچنین پایداری در مقابل نوفه تصادفی نسبت به سایر رویکردهای محاسبه نشانگر همدوسی از محبوبیت بیشتری برخوردار است (Hashemi Gazar and Javaherian, 2011; Javaheri et al., 2007).

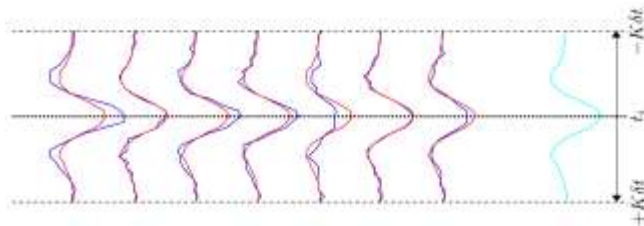
اولین الگوریتم محاسبه نشانگر لرزه‌ای همدوسی مبتنی بر همبستگی متقابل ردلرزه‌ها بود که برای تصویرسازی ناپیوستگی‌ها و سایر ویژگی‌های ساختاری در داده‌های لرزه‌ای معرفی شدند (Bahorich and Farmer, 1995). دومین الگوریتم محاسبه نشانگر لرزه‌ای همدوسی مبتنی بر شباهت بود. این الگوریتم از روش تحلیل شباهت برای محاسبه همدوسی و شناسایی ناپیوستگی‌ها در داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌کند (Marfurt et al., 1998). گرسنتکون و مارفورت در سال ۱۹۹۹، سومین الگوریتم محاسبه نشانگر لرزه‌ای همدوسی را معرفی کردند که مبتنی بر ساختار ویژه است. این الگوریتم، از قدرت تفکیک بسیار بالایی برای تصویرسازی

ناپیوستگی‌های ساختاری در داده‌های لرزه‌ای به خصوص در داده‌های سه‌بعدی برخوردار است (Gersztenkorn and Marfurt, 1999). در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای بهبود محاسبه همدوسی لرزه‌ای و افزایش دقت شناسایی ناپیوستگی‌ها توسعه یافته‌اند. دو الگوریتم متداول شباهت و ساختار ویژه و نسخه‌های بهبودیافته آن‌ها به صورت محاسبه معیار همدوسی در یک پنجره تحلیل متحرک شیب‌گرا که کل داده لرزه‌ای را پوشش می‌دهد، عمل می‌کنند.

لی و همکاران (۲۰۰۶)، الگوریتم بهبودیافته‌ای مبتنی بر ساختار ویژه را بر اساس روش سوپر ردلرزه معرفی کردند که پایداری در برابر نوفه را افزایش می‌دهد (Li et al., 2006). جواهری نیستانک و همکاران (۲۰۰۷)، نشان دادند که نشانگر همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه، قدرت تفکیک بالاتری نسبت به روش همبستگی متقابل دارد (Javaheri et al., 2007). وانگ و همکاران (۲۰۱۲) با بهینه‌سازی الگوریتم ساختار ویژه، هزینه محاسباتی آن را کاهش و سرعت پردازش را افزایش دادند (Wang et al., 2012). میرکمالی و همکاران (۲۰۱۵) با تلفیق نشانگرهای لرزه‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی، موفق به شناسایی دقیق سامانه‌های گسلی پیچیده در منطقه تنگه هرمز شدند. آن‌ها نشان دادند که ترکیب نشانگرهای پیشرفته با الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تفسیر ساختارهای زیرسطحی فراهم آورد (Mirkamali et al., 2015). هوو و همکاران (۲۰۱۹) الگوریتمی کارآمدتر برای کاهش هزینه محاسباتی بدون افت کیفیت بصری ارائه کردند (Huo et al., 2019). ژائو و همکاران (۲۰۲۰) الگوریتمی با عنوان C3m را معرفی کردند که ضمن افزایش مقاومت در برابر نوفه، کارایی محاسباتی را بهبود بخشید (Zhao et al., 2020). لی و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی کاربردهای نشانگر همدوسی لرزه‌ای در شناسایی ناپیوستگی‌ها از جمله گسل‌ها و کانال‌ها پرداختند (Li et al., 2021).

نشانگر لرزه‌ای همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه متداول، جهت محاسبه کمی همدوسی درون پنجره تحلیل، از مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس حاصل از ردلرزه‌های درون پنجره تحلیل استفاده می‌کند. مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس به تنهایی قادر به توصیف تمام ویژگی‌های ناپیوستگی‌های لرزه‌ای به خصوص در شرایطی که ناپیوستگی همراه با جابجایی زمانی رویدادهای بازتابی نباشد، نیستند. مقادیر ویژه فقط به تغییر انرژی بازتاب‌ها حساس هستند. بنابراین، در شناسایی ناپیوستگی‌های لرزه‌ای که سبب ایجاد تغییر شکل موجک بدون تغییر انرژی آن می‌شوند، ناتوان است.

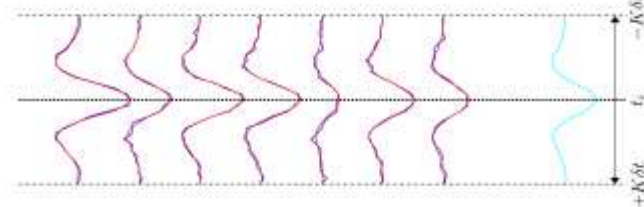
در این مقاله، روش جدیدی ارائه شده است که همزمان از بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس، در کنار مقادیر ویژه، برای محاسبه نشانگر همدوسی بهره می‌گیرد. بردارهای ویژه نسبت به تغییرات شکل و جهت‌گیری بازتاب‌ها حساس هستند و ترکیب آن‌ها با مقادیر ویژه که فقط به تغییر انرژی حساسیت دارند، می‌تواند عملکرد نشانگر همدوسی را در شناسایی انواع ناپیوستگی‌ها به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در همین راستا، معادله‌ای جدید برای محاسبه همدوسی توسعه داده شده است که امکان استفاده هم‌زمان از بردارها و مقادیر ویژه را در شناسایی فراهم می‌سازد.



شکل ۱: شکل مفهومی الگوریتم شباهت برای محاسبه همدوسی.

۲-۲- نشانگر همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه متداول

محاسبه همدوسی در الگوریتم ساختار ویژه، C_e ، تا حدودی مشابه محاسبه همدوسی در الگوریتم شباهت است. در الگوریتم شباهت، میزان همدوسی از نسبت انرژی ردلرزه‌های میانگین به انرژی ردلرزه‌های اولیه به دست می‌آید، در حالی که در الگوریتم ساختار ویژه، همدوسی از نسبت انرژی مولفه اصلی اول به انرژی ردلرزه‌های اولیه محاسبه می‌شود. در شکل ۲ مفهوم الگوریتم ساختار ویژه در محاسبه همدوسی نشان داده شده است. شکل ۲ همان پنجره تحلیل شکل ۱ با هفت ردلرزه‌های (ردلرزه‌های آبی رنگ) را نشان می‌دهد. مولفه اصلی اول (ردلرزه‌های قرمز) از تکرار نسخه مقیاس شده ردلرزه‌ای که بهترین توصیف شکل موج در پنجره تحلیل است (ردلرزه فیروزه‌ای رنگ) به دست می‌آیند. ضریب مقیاس بر اساس دامنه ردلرزه اولیه انتخاب می‌گردد. اگر پنجره تحلیل اولیه از یک رویداد همدوس ایده‌آل تشکیل شده باشد، ردلرزه‌ای که بهترین توصیف شکل موج در پنجره تحلیل را دارد (ردلرزه میانگین فیروزه‌ای) با تمام ردلرزه‌های آبی درون پنجره تحلیل اولیه یکسان خواهد شد. بنابراین، مقدار همدوسی که نسبت انرژی ردلرزه‌های قرمز به انرژی ردلرزه‌های آبی است، برابر یک به دست می‌آید. در صورتی که پنجره تحلیل به صورت داده‌های کاملاً تصادفی باشد، ردلرزه‌ای که بهترین توصیف شکل موج در پنجره تحلیل را دارد (ردلرزه میانگین فیروزه‌ای) دارای انرژی نزدیک به صفر خواهد بود که منجر به صفر شدن انرژی مقدار همدوسی می‌شود. بنابراین، مقدار همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه نیز همواره در بازه $C_e \in [0,1]$ قرار دارد.



شکل ۲: شکل مفهومی الگوریتم ساختار ویژه برای محاسبه همدوسی.

جهت محاسبه انرژی مولفه اصلی اول در الگوریتم ساختار ویژه از ماتریس کوواریانس مطابق رابطه (۲) استفاده می‌شود (Cansiz, 2023).

$$\mathbf{CM} = \mathbf{D}^T \mathbf{D} = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T \quad (2)$$

۲- روش‌شناسی تحقیق

نشانگر لرزه‌ای همدوسی در طی سه دهه اخیر کاربردهای مختلفی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای پیدا کرده است. از جمله این کاربردها می‌توان به تخمین شیب بازتابنده، محاسبه اولین رسید، تصحیح استاتیک‌های باقیمانده و شناسایی خودکار افق‌ها اشاره کرد (Javaheri Niestanak et al., 2007). بیشترین کاربرد نشانگر لرزه‌ای همدوسی بر شناسایی ناپیوستگی لرزه‌ای متمرکز است (Mohammad-Abadi et al., 2012). همانطور که بیان شد، رویکردهای شباهت و ساختار ویژه متداول‌ترین رویکردهای محاسبه نشانگر لرزه‌ای همدوسی هستند. به همین دلیل در این بخش، ابتدا این دو رویکرد معرفی می‌شوند و سپس محدودیت‌های روش ساختار ویژه بیان و راهکار پیشنهادی برای رفع آن ارائه می‌گردد.

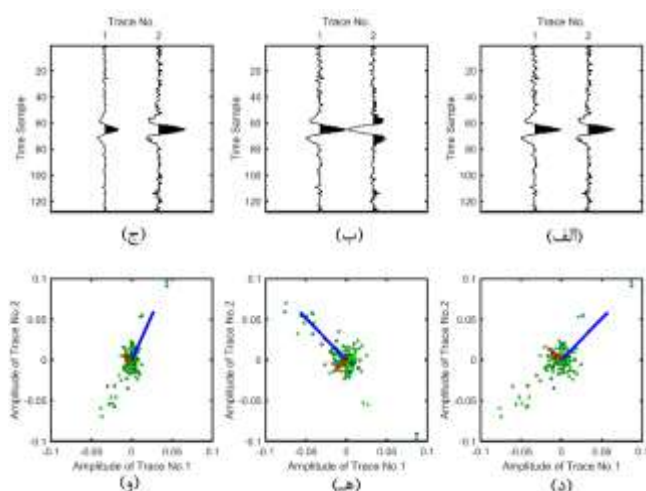
۲-۱- نشانگر همدوسی مبتنی بر شباهت

برای محاسبه همدوسی مبتنی بر شباهت در یک نمونه از حجم داده لرزه‌ای، ابتدا پنجره‌ای با ابعاد مشخص حول نمونه موردنظر، با توجه به شیب و آزمون رویداد بازتابی در آن نمونه، در نظر گرفته می‌شود. اگر پنجره تحلیل شامل J ردلرزه با $N = 2K + 1$ نمونه از هر ردلرزه باشد، مقدار همدوسی مبتنی بر شباهت، C_s ، برای نمونه مرکزی پنجره تحلیل، (t_i, x_i, y_i) ، مطابق رابطه (۱) بدست می‌آید (Marfurt et al., 1998).

$$C_s(t_i, x_i, y_i) = \frac{\sum_{k=-K}^{+K} \left\{ \left[\sum_{j=1}^J u(t + k\delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j) \right]^2 \right\}}{J \sum_{k=-K}^{+K} \sum_{j=1}^J \left\{ \left[u(t + k\delta t - px_j - qy_j, x_j, y_j) \right]^2 \right\}} \quad (1)$$

که در آن، $u(t_i, x_i, y_i)$ نمونه داده لرزه‌ای در زمان t_i و مختصات مکانی (x_i, y_i) است. δt ، p و q به ترتیب گام نمونه‌برداری زمانی، شیب ظاهری زمانی در راستای مختصات x و شیب ظاهری زمانی در راستای مختصات y هستند. در شکل ۱ مفهوم رابطه شباهت در محاسبه همدوسی نشان داده شده است. در شکل ۱ یک پنجره تحلیل شیب‌گرای انتخاب شده با هفت ردلرزه (ردلرزه‌های آبی رنگ) نشان داده شده است که انرژی آن‌ها در مخرج رابطه ۱ قرار می‌گیرد. عبارت صورت در رابطه ۱ معادل انرژی ردلرزه‌های قرمز است که از تکرار ردلرزه میانگین پنجره تحلیل (ردلرزه فیروزه‌ای رنگ) به دست می‌آیند. در صورتی که پنجره تحلیل شامل یک رویداد همدوس ایده‌آل باشد، ردلرزه میانگین فیروزه‌ای با تمام ردلرزه‌های آبی درون پنجره برابر خواهد شد. بنابراین، انرژی ردلرزه‌های قرمز با انرژی ردلرزه‌های آبی برابر خواهد شد و مقدار همدوسی برابر یک به دست می‌آید. چنانچه، پنجره تحلیل شامل داده‌های کاملاً تصادفی باشد، میانگین آن‌ها نزدیک به صفر خواهد شد که منجر به صفر شدن انرژی ردلرزه‌های میانگین (قرمز) و در نهایت صفر شدن مقدار همدوسی می‌شود. بنابراین، مقدار همدوسی مبتنی بر شباهت همواره در بازه $C_s \in [0,1]$ قرار دارد.

اتفاق بیافتد و تغییر انرژی در آن‌ها ناچیز باشد و یا وجود نداشته باشد، نتواند عملکرد مناسبی داشته باشد. به عبارت دیگر، الگوریتم ساختار ویژه متداول فقط به تغییر انرژی مویک حساس است و نسبت به تغییر شکل مویک حساسیت ندارد. بنابراین، بردار ویژه ماتریس کوواریانس می‌تواند کمیت جایگزین برای مقدار ویژه در محاسبه همدوسی باشد. اما با توجه به نتایج دو مدل (الف) و (ج) می‌توان مشاهده کرد که بردار ویژه نیز به تنهایی توانایی تفکیک میان این دو حالت را ندارد. لذا استفاده همزمان از مقدار ویژه و بردار ویژه در محاسبه همدوسی ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۳: شکل مفهومی جهت درک بهتر محدودیت الگوریتم ساختار ویژه. (الف) مدل دو ردلرزه حاوی رویداد همدوس آغشته به نوفه تصادفی، (ب) مدل دو ردلرزه حاوی رویداد با قطبش معکوس آغشته به نوفه تصادفی و (ج) مدل دو ردلرزه حاوی رویداد با تغییر دامنه آغشته به نوفه تصادفی. (د) تا (و) نمودار تقاطعی دامنه ردلرزه اول نسبت به دامنه ردلرزه دوم برای مدل‌های شکل ۳- (الف)، (ب) و (ج) به همراه مولفه اصلی اول (آبی) و مولفه اصلی دوم (قرمز).

همانطور که مشاهده می‌شود، کمیت بردار ویژه بر خلاف مقدار ویژه نسبت به تغییر شکل موج حساس است. سویی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده بردار ویژه علاوه بر مقدار ویژه در محاسبه همدوسی، نسخه بهبود یافته‌ای از الگوریتم ساختار ویژه را پیشنهاد کردند که در شرایط تغییر شکل مویک بدون تغییر انرژی نیز توانایی شناسایی ناپیوستگی را دارا است.

۲-۴- نشانگر همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه بهبودیافته

برای یک پنجره تحلیل مطابق رابطه (۳) که دارای J ردلرزه می‌باشد، می‌توان تعداد J مولفه اصلی به صورت pc_i و $i = 1:J$ به دست آورد که متناظر با مقدار ویژه λ_i و بردار ویژه $v_j = [v_{1,j} \ v_{2,j} \ \dots \ v_{J,j}]^T$ هستند.

با تعریف ماتریس‌های S و V به صورت رابطه (۵) می‌توان مطابق رابطه (۶)، ردلرزه i -ام پنجره تحلیل را به صورت ترکیب وزنی مولفه‌های اصلی نوشت که ضرایب وزنی توسط سطر i -ام ماتریس V تعریف می‌شود (Sui et al., 2023).

که در آن، $d_i = [d_{11}, d_{21}, \dots, d_{N1}]^T$ ردلرزه i -ام در پنجره تحلیل انتخاب شده است و ماتریس D مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود (Li et al., 2021).

$$D = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_1 & d_2 & \dots & d_J \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \dots & d_{NJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1J} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \dots & d_{NJ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

بر اساس تئوری روش تحلیل مولفه‌های اصلی (Naik, 2017)، میزان انرژی هر مولفه اصلی برابر با مقدار ویژه ماتریس کوواریانس متناظر با آن مولفه اصلی است. بنابراین، گرسنتکون و مارفورت (۱۹۹۹) نشان دادند که همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه متداول را می‌توان به صورت رابطه (۴) نوشت (Gersztenkorn and Marfurt, 1999).

$$C_e = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j} \quad (4)$$

که در آن، λ_i مقدار ویژه i -ام ماتریس کوواریانس است.

۳-۲- محدودیت الگوریتم ساختار ویژه متداول

با استفاده از مثال شکل ۳ می‌توان به درک بهتری از محدودیت الگوریتم ساختار ویژه متداول دست یافت. در این مثال، سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است. در حالت اول که در شکل ۳- (الف) نشان داده شده است، دو ردلرزه حاوی رویداد همدوس که به نوفه تصادفی آغشته شده‌اند، نشان داده شده است. در حالت دوم که در شکل ۳- (ب) نشان داده شده است، همان مدل حالت اول است با این تفاوت که قطبش ردلرزه شماره ۲ به اندازه ۱۸۰ درجه تغییر نموده است. حالت سوم که در شکل ۳- (ج) نشان داده شده است، همان مدل حالت اول است با این تفاوت که دامنه ردلرزه شماره ۱ در حالت بدون نوفه در عدد ۵/۰ ضرب شده و سپس به نوفه تصادفی آغشته شده است. در شکل‌های ۳- (د) تا ۳- (و) به ترتیب نمودار تقاطعی دامنه‌های ردلرزه شماره ۱ بر حسب ردلرزه شماره ۲ به صورت نقاط سبز رنگ برای سه حالت مذکور نمایش داده شده است. در این شکل‌ها، مولفه اصلی اول با استفاده از بردار آبی و مولفه اصلی دوم با استفاده از بردار قرمز نشان داده شده است که طول و جهت هر یک از آن‌ها به ترتیب با مقدار ویژه و جهت بردار ویژه متناظر آن برابر است. همانطور که بیان شد، همدوسی در الگوریتم ساختار ویژه به صورت نسبت مقدار ویژه اول ماتریس کوواریانس به مجموع مقادیر ویژه آن تعریف می‌شود. با توجه به نتایج شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد که از نظر معیار همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه متداول تفاوتی میان دو مدل (الف) و (ب) وجود ندارد و مقدار همدوسی با توجه به یکسان بودن مقدار ویژه اول ماتریس کوواریانس در دو حالت اشاره شده، یکسان خواهد بود. این واقعیت سبب می‌شود که الگوریتم ساختار ویژه متداول علیرغم تمام مزایایی که نسبت به معیارهای دیگر همدوسی نظیر شباهت برخوردار است، در ناپیوستگی‌هایی که فقط تغییر شکل مویک

حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل در شکل‌های ۴- (الف) و (ب) نشان داده شده است. مقدار همدوسی محاسبه شده با استفاده از یک پنجره تحلیل 11×3 (۱۱ نمونه زمانی و ۳ ردلرزه) برای سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبودیافته در نمونه زمانی شماره ۵۰ در شکل‌های ۴- (ج) و (د) به ترتیب برای داده بدون نوفه و آغشته به نوفه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، محل ناپیوستگی در روش پیشنهادی با کمترین مقدار همدوسی نسبت به هر دو روش شباهت و ساختار ویژه متداول در هر دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه نشان داده شده است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که روش پیشنهادی بتواند با وضوح و قدرت تفکیک بهتری ناپیوستگی‌های با جابجایی زمانی را شناسایی کند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی همانند دو روش دیگر در مقابل نوفه پایداری قابل قبولی دارد.

۲-۳- مدل مصنوعی ناپیوستگی لرزه‌ای با تغییر قطبش

مدل ناپیوستگی مصنوعی لرزه‌ای با تغییر قطبش معمولاً در شرایطی اتفاق می‌افتد که به دلیل تغییر خصوصیات کُشسان محیط انتشار موج در دو طرف مرز ناپیوستگی، قطبش موج بازتاب در طرفین مرز ناپیوستگی عکس یکدیگر است. این حالت در شرایط مختلف زمین‌شناسی نظیر کانال‌های مدفون ممکن است مشاهده شود که رسوبات پرکننده آن‌ها با رسوبات در برگیرنده آن‌ها دارای خصوصیات کُشسانی متفاوت هستند. البته معمولاً در چنین شرایطی جابجایی زمانی نیز اتفاق می‌افتد. اما در این مثال مصنوعی، به منظور پیچیده‌تر شدن مدل، فقط تغییر قطبش در نظر گرفته شده است. مोजک مورد استفاده در تولید داده مصنوعی، موج ریکر ۳۰ هرتز است. این مدل مصنوعی نیز در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل در نظر گرفته شده است که در شکل‌های ۵- (الف) و (ب) نشان داده شده است. همدوسی با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 (۱۱ نمونه زمانی و ۳ ردلرزه) برای سه روش مورد نظر در نمونه زمانی شماره ۴۵ محاسبه گردید که در شکل‌های ۵- (ج) و (د) به ترتیب برای داده بدون نوفه و آغشته به نوفه نشان داده شده است.

$$PC_{N \times J} = [pc_1 \quad pc_2 \quad \cdots \quad pc_J] \quad (5)$$

$$V_{J \times J} = [v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_J]$$

$$d_i = v_{i,1}pc_1 + v_{i,2}pc_2 + \cdots + v_{i,J}pc_J \quad (6)$$

بنابراین، می‌توان از بردارهای ویژه نیز در محاسبه نشانگر همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه استفاده نمود. از آنجایی که مطابق رابطه (۶) عناصر بردار ویژه J -ام، وزن‌های مولفه اصلی pc_j در ترکیب وزنی تشکیل می‌دهند، می‌توان مقدار همدوسی مبتنی بر بردار ویژه J -ام را به صورت رابطه (۷) تعریف کرد (Sui et al., 2023).

$$C_{v_j} = \frac{(\sum_{k=1}^J v_{k,j})^2}{J \sum_{k=1}^J v_{k,j}^2} \quad (7)$$

چنانچه ردلرزه‌های درون پنجره تحلیل D کاملاً یکسان باشند و یا به عبارت دیگر پنجره تحلیل شامل یک رویداد همدوس باشد، بردار ویژه متناظر با مولفه اصلی اول با زاویه ۴۵ درجه نسبت به محورهای مختصاتی خواهد داشت. در چنین شرایطی، درایه‌های بردار ویژه یکسان خواهند بود و در نتیجه مقدار همدوسی به صورت $C_{v_1} = 1$ خواهد شد. از آنجایی که C_{v_1} مربوط به بزرگترین مقدار ویژه است، می‌تواند تفاوت انرژی بین مولفه اصلی اول و سایر مولفه‌های اصلی را بهتر نشان دهد. بنابراین، همدوسی کامل در یک پنجره تحلیل را می‌توان با استفاده همزمان از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس مطابق رابطه (۸) بدست آورد. مقادیر ویژه نشان دهنده تغییر انرژی و بردارهای ویژه نشان دهنده تغییر شکل موج در محاسبه همدوسی هستند (Sui et al., 2023).

$$C_{full} = \frac{\lambda_1 C_{v_1}}{\sum_{j=1}^J \lambda_j} \quad (8)$$

۳- نتایج مدل مصنوعی و واقعی

به منظور ارزیابی الگوریتم ساختار ویژه بهبودیافته و مقایسه نتایج آن با الگوریتم متداول شباهت و ساختار ویژه، عملکرد الگوریتم ساختار ویژه بهبودیافته از چندین مدل مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی استفاده گردید. پس از تایید عملکرد الگوریتم پیشنهادی در داده‌های مصنوعی، عملکرد آن در دو داده‌های لرزه‌ای واقعی نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۳-۱- مدل مصنوعی ناپیوستگی لرزه‌ای با جابجایی زمانی

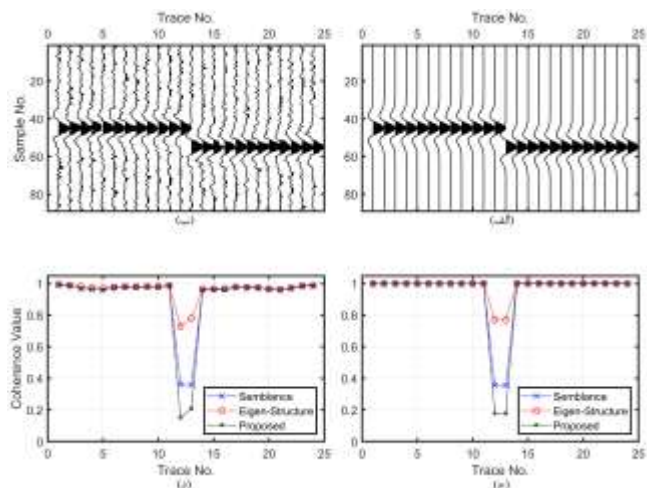
مدل ناپیوستگی مصنوعی لرزه‌ای با جابجایی زمانی معادل یک گسل نرمال است که فقط باعث جابجایی بازتابنده‌ها در دو طرف صفحه گسل شده است. مोजک مورد استفاده در تولید داده مصنوعی، موج ریکر ۳۰ هرتز و میزان جابجایی زمانی در محل ناپیوستگی برابر ۱۰ نمونه زمانی است. این مدل مصنوعی در دو

۳-۳- مدل مصنوعی ناپیوستگی لرزه‌ای با تغییر شکل موج

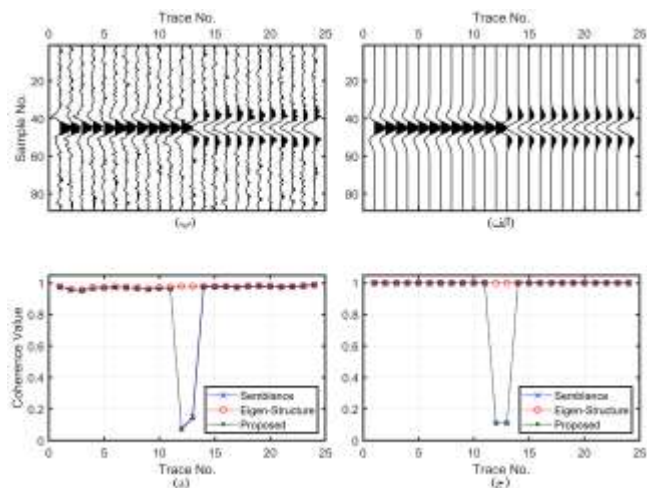
مدل ناپیوستگی مصنوعی لرزه‌ای با تغییر شکل موج معمولاً در شرایط زمین‌شناسی مشابه مدل مصنوعی ناپیوستگی لرزه‌ای با تغییر قطبش اتفاق می‌افتد با این تفاوت که تغییر خصوصیات کشسان محیط انتشار موج در دو طرف مرز ناپیوستگی، به جای تغییر قطبش موج بازتاب در طرفین مرز ناپیوستگی سبب تغییر شکل آن‌ها شود. برای تولید داده مصنوعی لرزه‌ای متناظر با مدل در نظر گرفته شده از دو موجک ریکر ۳۰ و ۶۰ هرتز در دو طرف مرز ناپیوستگی استفاده شده است. داده لرزه‌ای متناظر با این مدل مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل در شکل‌های ۶-الف) و (ب) نشان داده شده است. نمودار همدوسی محاسبه شده در نمونه زمانی شماره ۴۵ برای سه روش مورد نظر با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در شکل‌های ۶-ج) و (د) به ترتیب برای داده بدون نوفه و آغشته به نوفه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر سه روش توانسته‌اند با توجه به تغییر شکل و تغییر انرژی ایجاد شده در مرز ناپیوستگی، آن را شناسایی کنند. البته عملکرد دو روش پیشنهادی و شباهت نسبت به ساختار ویژه متداول در هر دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه بهتر است و روش پیشنهادی یک بهبود نسبی قابل مشاهده‌ای نسبت به روش شباهت نشان داده است.

۳-۴- مدل مصنوعی ناپیوستگی لرزه‌ای با تغییر شکل موج و قطبش

مدل ناپیوستگی مصنوعی لرزه‌ای با تغییر شکل موج و قطبش ترکیبی از دو مدل مصنوعی قبلی است که هم تغییر شکل (تغییر موجک ریکر ۳۰ با ۶۰ هرتز در محل مرز ناپیوستگی) و هم تغییر قطبش اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر تغییر خصوصیات کشسان در طرفین مرز ناپیوستگی به گونه‌ای است که هم تغییر شکل موجک و هم تغییر قطبش را به همراه داشته است. داده لرزه‌ای متناظر با این مدل مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل در شکل‌های ۷-الف) و (ب) نشان داده شده است و مشابه مدل‌های مصنوعی قبلی، نمودار همدوسی محاسبه شده در نمونه زمانی شماره ۴۵ برای سه روش مورد نظر با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در شکل‌های ۷-ج) و (د) به ترتیب برای داده بدون نوفه و آغشته به نوفه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، دو روش شباهت و ساختار ویژه بهبودیافته توانسته‌اند به خوبی و با دقت بالایی مرز ناپیوستگی را شناسایی کنند. حتی روش پیشنهادی میزان همدوسی را در محل ناپیوستگی با مقدار صفر مشخص نموده است که قدرت تفکیک بالاتر این روش را نسبت به روش شباهت نشان می‌دهد. البته همانطور که انتظار می‌رود، روش ساختار ویژه متداول به دلیل عدم حساسیت به تغییر شکل موج، نتوانسته است مرز ناپیوستگی را به خوبی دو روش دیگر مشخص نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در این مدل مصنوعی نیز، نوفه تاثیر مخرب چشمگیری در نتایج نسبت به حالت بدون نوفه ندارد.



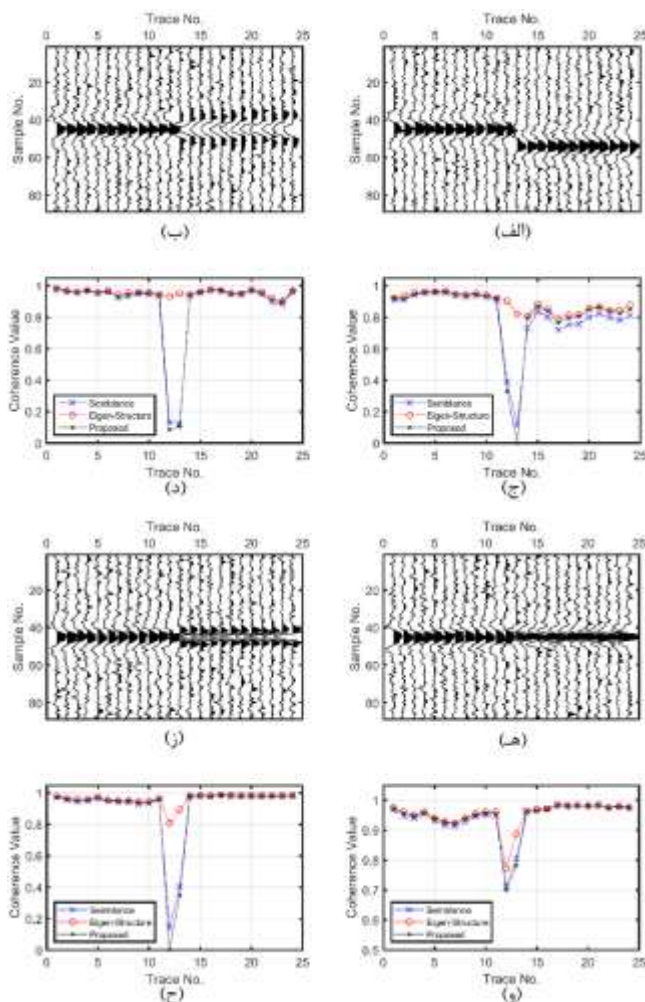
شکل ۴: مقطع لرزه‌ای مربوط به مدل مصنوعی ناپیوستگی با جابجایی زمانی در حالت (الف) بدون نوفه و (ب) آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل. مقدار همدوسی محاسبه شدن در نمونه زمانی شماره ۵۰ با سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبودیافته با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در دو حالت داده (ج) بدون نوفه و (د) آغشته به نوفه تصادفی.



شکل ۵: مقطع لرزه‌ای مربوط به مدل مصنوعی ناپیوستگی با تغییر قطبش در حالت (الف) بدون نوفه و (ب) آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل. مقدار همدوسی محاسبه شدن در نمونه زمانی شماره ۴۵ با سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبودیافته با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در دو حالت داده (ج) بدون نوفه و (د) آغشته به نوفه تصادفی.

همانطور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی و شباهت به خوبی محل ناپیوستگی را با مقدار کم همدوسی نسبت به ساختار ویژه متداول در هر دو حالت بدون نوفه و آغشته به نوفه شناسایی کنند. در این حالت چون تغییر انرژی در دو طرف مرز ناپیوستگی رخ نداده است و فقط تغییر شکل اتفاق افتاده است، روش ساختار ویژه متداول نسبت به ناپیوستگی عملکرد مناسبی نداشته است و نتوانسته آن را شناسایی کند. همچنین، نتایج در این مدل نیز نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقابل نوفه پایداری قابل قبولی دارد.

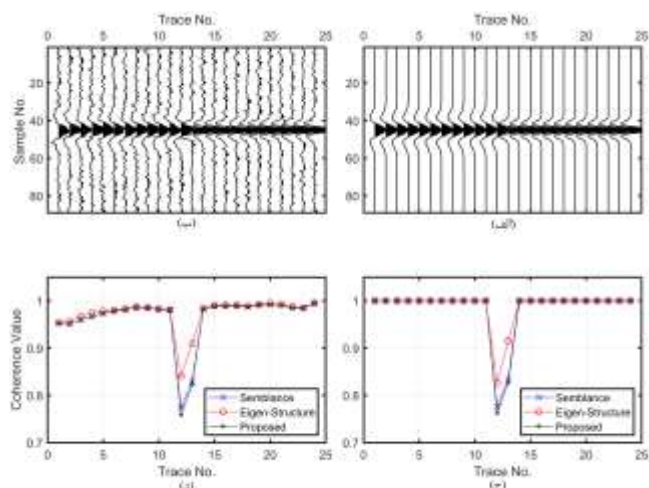
مدل مصنوعی با سطح نوفه بالا در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، حتی در حضور نوفه تصادفی با سطح نسبت سیگنال به نوفه بالا، الگوریتم ساختار ویژه بهبود یافته از پایداری مطلوبی برخوردار بوده و عملکرد تقریباً یکسان نسبت به حالت بدون نوفه از خود نشان داده است.



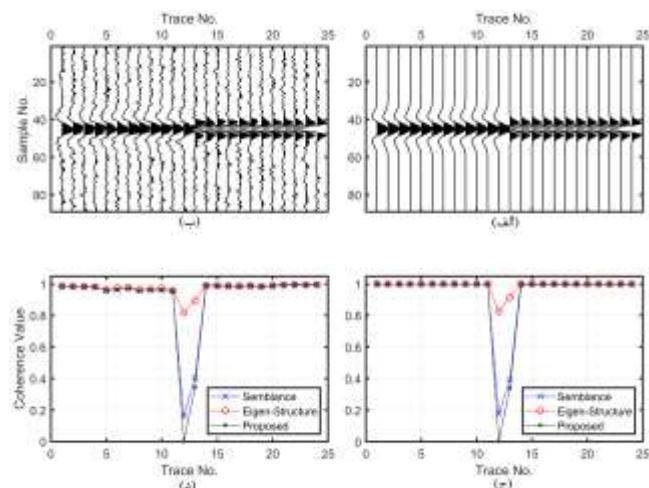
شکل ۸: مقطع لرزه‌ای در حالت آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۳- دسی‌بل و همدوسی محاسبه شده به سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبود یافته برای (الف و ج) مدل مصنوعی شکل ۴، (ب و د) مدل مصنوعی شکل ۵، (ه و و) مدل مصنوعی شکل ۶ و (ز و ح) مدل مصنوعی شکل ۷.

۳-۶- داده لرزه‌ای واقعی اول

داده لرزه‌ای اول، بخش از داده لرزه‌ای سه بعدی بلوک F3 در بخش هلندی دریای شمال است که به منظور پی‌جویی و اکتشاف نفت و گاز در لایه‌های ژوراسیک فوقانی و کرتاسه زیرین برداشت شده‌اند. حضور و فعالیت تکتونیکی ناشی از گنبد نمکی زچستاین در منطقه مورد مطالعه منجر به ایجاد ناپیوستگی‌ها و گسل‌های فراوانی در منطقه مورد مطالعه شده است (Shirazi et al., 2023). شکل ۹ بخشی از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی برداشت شده از این منطقه را



شکل ۶: مقطع لرزه‌ای مربوط به مدل مصنوعی ناپیوستگی با تغییر شکل موج در حالت (الف) بدون نوفه و (ب) آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل. مقدار همدوسی محاسبه شدن در نمونه زمانی شماره ۴۵ با سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبود یافته با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در دو حالت داده (ج) بدون نوفه و (د) آغشته به نوفه تصادفی.

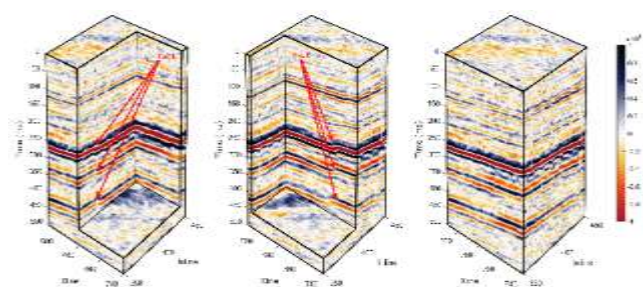


شکل ۷: مقطع لرزه‌ای مربوط به مدل مصنوعی ناپیوستگی با تغییر شکل موج و قطبش در حالت (الف) بدون نوفه و (ب) آغشته به نوفه تصادفی به میزان ۳ دسی‌بل. مقدار همدوسی محاسبه شدن در نمونه زمانی شماره ۴۵ با سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و بهبود یافته با استفاده از پنجره تحلیل 11×3 در دو حالت داده (ج) بدون نوفه و (د) آغشته به نوفه تصادفی.

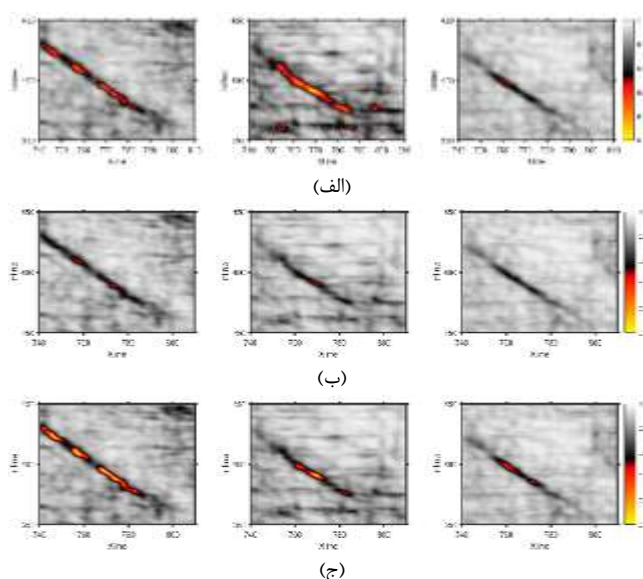
۳-۵- بررسی عملکرد روش در مقابل سطح نوفه تصادفی بالا

در ادامه روند بررسی‌های انجام‌شده، جهت ارزیابی میزان پایداری الگوریتم‌های مورد استفاده در سطوح نوفه تصادفی بالاتر، چهار مدل مصنوعی ناپیوستگی تولید شده در این مقاله، به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۳- دسی‌بل آغشته شدند. البته قبل از تفسیر داده‌های لرزه‌ای، بخش زیادی از نوفه تصادفی در مراحل مختلف پردازش داده‌های لرزه‌ای تضعیف می‌شوند. نتایج محاسبه نشانگر همدوسی با استفاده از سه روش شباهت، ساختار ویژه متداول و ساختار ویژه بهبود یافته برای چهار

است، بخشی از داده لرزه‌ای سه بعدی مربوط به شمال شرق ایران در محدوده میدان گازی سرخس می‌باشد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، یک گسل در قابل رویت می‌باشد که با پیکان قرمز مشخص شده است. نتایج سه نشانگر همدوسی مبتنی بر شباهت، ساختار ویژه متداول و ساختار ویژه تحلیل و $15 \times 5 \times 5$ نمونه زمانی و ۵ نمونه در راستای خط چشمه و خط گیرنده) محاسبه گردید که در شکل‌های ۱۲- (الف) تا (ج) در سه برش زمانی ۳۱۲، ۲۵۲، و ۴۱۶ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مشابه به داده لرزه ای واقعی اول، روش ساختار ویژه بهبودیافته با مقادیر همدوسی نزدیک به صفر، گسل مورد نظر را مشخص نموده است؛ در صورتی که در دو روش دیگر مقدار همدوسی در محل ناپیوستگی حدود ۰/۵ و بزرگ‌تر می‌باشد که قدرت تفکیک پایین‌تر آن‌ها را در مقابل روش پیشنهادی نشان می‌دهد. همچنین به راحتی به خصوص در برش زمانی ۳۱۲ میلی‌ثانیه می‌توان دید که الگوریتم شباهت دارای پدیده‌های کاذبی است که می‌توانند به هنگام تفسیر مشکلاتی ایجاد نماید.

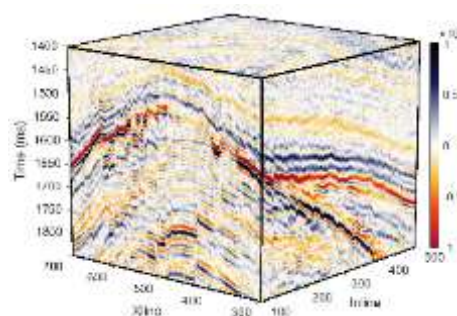


شکل ۱۱: بخشی از داده لرزه‌ای میدان گازی سرخس در نمای کامل و دو نمای برش خورده که محل گسل با پیکان‌های قرمز مشخص شده است.

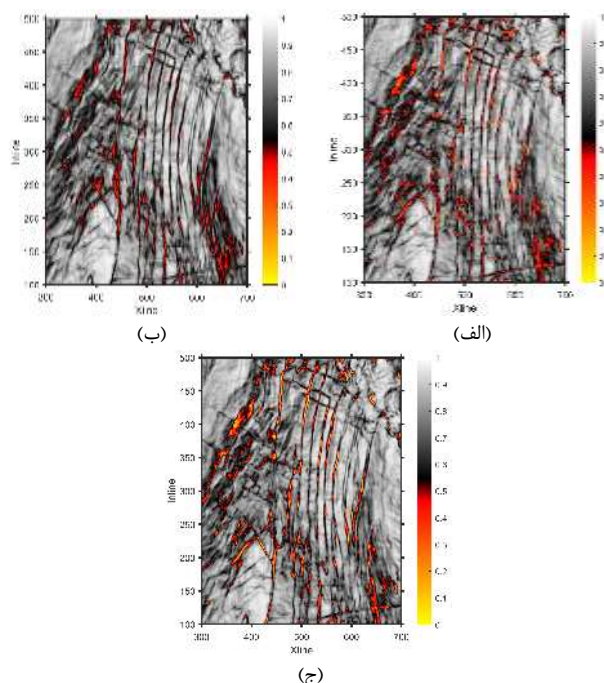


شکل ۱۲: نتایج نشانگر همدوسی در برش‌های زمانی به ترتیب از راست به چپ ۳۱۲، ۲۵۲ و ۴۱۶ میلی‌ثانیه با استفاده از الگوریتم (الف) شباهت، (ب) ساختار

پس از پردازش نشان می‌دهد. نتایج سه نشانگر همدوسی مبتنی بر شباهت، ساختار ویژه متداول و ساختار ویژه بهبود یافته با استفاده از پنجره تحلیل $15 \times 5 \times 5$ (۱۵ نمونه زمانی و ۵ نمونه در راستای خط چشمه و خط گیرنده) محاسبه گردید که در شکل‌های ۱۰- (الف) تا (ج) نتایج آن‌ها در برش زمانی ۱۶۹۲ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نشانگرهای همدوسی مبتنی بر شباهت و ساختار ویژه متداول، هرچند در شناسایی ناپیوستگی‌های عملکرد قابل قبولی دارند، اما محل گسل‌ها را با مقدار همدوسی حدود ۰/۵ نشان داده‌اند در صورتی که روش ساختار ویژه بهبودیافته، گسل‌ها را با مقدار همدوسی نزدیک به صفر مشخص کرده است که حاکی از وضوح و قدرت تفکیک بهتر روش ساختار ویژه بهبودیافته در تشخیص ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها نسبت به دو روش دیگر است.



شکل ۹: بخشی از داده لرزه‌ای سه بعدی بلوک F3.



شکل ۱۰: نتایج نشانگر لرزه‌ای همدوسی در برش زمانی ۱۶۹۲ میلی‌ثانیه از شکل ۸ به دست آمده از روش (الف) شباهت، (ب) ساختار ویژه متداول و (ج) ساختار ویژه بهبودیافته.

۶-۳- داده لرزه‌ای واقعی دوم

داده لرزه‌ای واقعی دوم که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته

۵- فهرست نمادها

نماد	شرح
C_s	همدوسی مبتنی بر شباهت
C_e	همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه متداول
C_{full}	همدوسی مبتنی بر ساختار ویژه بهبودیافته
C_{v_i}	همدوسی مبتنی بر بردار ویژه i -ام
d	ردلرزه
D	پنجره تحلیل
CM	ماتریس کوواریانس
v_i	بردار ویژه i -ام ماتریس کوواریانس
λ_i	مقدار ویژه i -ام ماتریس کوواریانس
pc_i	مولفه اصلی i -ام
$u(t, x, y)$	دامنه داده لرزه‌ای در مختصات جغرافیایی (x, y) و زمان t

۶- منابع

- Bahorich, M., and S. Farmer, 1995, 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube: The leading edge, **14**, no. 10, 1053-1058.
- Barnes, A., 2016, Handbook of Poststack Seismic Attributes, Society of Exploration Geophysicists, 21, 268 pp.
- Cansiz, S., 2023, A guide to Covariance, Covariance Matrix and Eigenvalues, Built In. <https://builtin.com/data-science/covariance-matrix>.
- Chopra, S., and K. J. Marfurt, 2007, Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization: SEG and EAGE.
- Gersztenkorn, A., and K. J. Marfurt, 1999, Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping: Geophysics, **64**, no. 5, 1468-1479.
- Hashemi Gazar, A., and A. Javaherian, 2011, Using semblance based coherency to detect micro faults in the Khangiran gas field: Earth and Space Physics, **37**, no. 1.
- Huo, Z., X. Liu, X. Wang, and W. Chen, 2019, An efficient eigenstructure-based coherence measure via dimensionality reduction: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, **16**, no. 11, 1711-1715.
- Javaheri Niestanak, A., A. Javaherian, and N. Amini, 2007, Faults Detection Using Seismic Coherency Attribute: Scientific Quarterly Journal of Geosciences, **17**, no. 65, 48-59.
- Li, F., B. Lyu, J. Qi, S. Verma, and B. Zhang, 2021, Seismic coherence for discontinuity interpretation: Surveys in Geophysics, 1-52.
- Li, Y., W. Lu, H. Xiao, S. Zhang, and Y. Li, 2006, Dip-scanning coherence algorithm using eigenstructure analysis and supertrace technique: Geophysics, **71**, no. 3, V61-V66.
- Marfurt, K. J., R. L. Kirilin, S. L. Farmer, and M. S.

ویژه متداول و (ج) ساختار ویژه بهبودیافته.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نشانگر همدوسی جدیدی بر پایه ترکیب مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس ارائه شده است. برخلاف روش‌های متداول که تنها به تغییرات انرژی حساس‌اند، روش پیشنهادی تغییرات شکل و قطبش را نیز شناسایی می‌کند. ارزیابی این روش بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی نشان داد که:

۱- در شرایط یکسان، الگوریتم ساختار ویژه بهبودیافته ناپیوستگی‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای را با مقادیر همدوسی بسیار کمتری از دو الگوریتم مبتنی بر شباهت و ساختار ویژه متداول آشکارسازی می‌کند که باعث افزایش قدرت تفکیک‌پذیری روش پیشنهادی در شناسایی ناپیوستگی نسبت به دو روش دیگر می‌شود.

۲- الگوریتم ساختار ویژه متداول برای شناسایی ناپیوستگی‌هایی که فقط سبب تغییر قطبش می‌شوند، کارآمد نیست؛ در صورتی که دو الگوریتم شباهت و ساختار ویژه بهبودیافته قابلیت شناسایی این چنین ناپیوستگی‌ها را با عملکرد نسبی یکسان دارند.

۳- به طور کلی نوفه بر روی عملکرد هر سه الگوریتم محاسبه همدوسی تأثیر مخرب چشمگیری ندارد و می‌توان گفت که هر سه روش در مقابل نوفه تصادفی پایدار هستند.

۴- تغییر شکل موجک لرزه‌ای سبب کاهش همدوسی در هر سه الگوریتم می‌شود. اما الگوریتم ساختار ویژه بهبودیافته نسبت به الگوریتم شباهت حساسیت بیشتری در مقابل تغییر شکل موج از خود نشان می‌دهد و حساسیت هر دو الگوریتم مذکور نسبت به الگوریتم ساختار ویژه متداول به تغییر شکل موج بیشتر است. به عبارت دیگر الگوریتم ساختار ویژه بهبودیافته توانایی بیشتری در شناسایی ناپیوستگی‌هایی که سبب تغییر شکل موج می‌شوند، دارد.

- Bahorich, 1998, 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm: *Geophysics*, **63**, no. 4, 1150-1165.
- Mirkamali, M., H. Ramazi, M. Bakhtiari, and H. Ramesh, 2015, Compilation of Seismic Attributes and Artificial Neural Networks in Identifying Fault Systems in the Hormuz Strait Area: *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, **24**, no. 95, 351-358.
- Naik, G. R., 2017, *Advances in principal component analysis: research and development*: Springer.
- Shirazi, M., A. Roshandel Kahoo, M. Radad, and G. Yu, 2023, Detecting shallow gas reservoir in the f3 block, The Netherlands, using offshore seismic data and high-resolution multi-synchrosqueezing transform: *Natural Resources Research*, **32**, no. 5, 2007-2035.
- Sui, J., X. Zheng, Q. Zeng, Z. Yang, L. Gan, and T. Hu, 2023, Seismic Coherence Attribute Based on Eigenvectors and Its Application: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- Suppe, J., 1985, *Principles of structural geology*: Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Talebi, A., S. Joneidi, M. Fereidooni, h. hashemi, G. R. shahalipour, and H. Ghandehari, 2023, Determining the probability of the faults and fractures in one of the oil reservoirs based on the seismic indicators of the steering cube: *Journal of Petroleum Geomechanics*, **6**, no. 2, 21-30. <http://dx.doi.org/10.22107/jpg.2023.394563.1196>.
- Taner, M., 2001, Seismic attributes: *Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder: CSEG Recorder*, September Issue, 48-56.
- Wang, X., J. Gao, W. Chen, and Y. Song, 2012, An efficient implementation of eigenstructure-based coherence algorithm using recursion strategies and the power method: *Journal of Applied Geophysics*, **82**, 11-18.
- Zhao, X., S. Wang, S. Yuan, C. Xu, and T. Wang, 2020, An efficient and robust scheme for the implementation of eigenstructure-based coherency algorithms: *Geophysics*, **85**, no. 5, O97-O108.