

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تخمین مؤلفه رتبه پایین به روش تجزیه تانسوری چندمقیاسی

نگارنده:

جواد مفاخری

اساتید راهنما

دکتر امین روشندل کاهو

دکتر محمدرداد

اساتید مشاور

مهندس رسول انوری

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دی ۱۳۹۹

شماره: ۴۹۸۲۰۵۱
تاریخ: ۹۹/۱۱/۱۱

باسمه تعالی



دانشگاه آزاد اسلامی
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جواد مفاخری با شماره دانشجویی ۹۶۱۴۰۴۴ رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه شناسی تحت عنوان تضعیف نوفه تصادفی در داده های لرزه ای با استفاده از تخمین مؤلفه رتبه پایین به روش تجزیه تانسوری چندمقیاسی که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۷-۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر امین روشندل کاهو	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد رداد	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس رسول انوری		
۴- استاد مشاور	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	دانشیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر یوسف شیری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روخانی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علیرضا احمدی فرد	دانشیار	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد علی محمدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به

بزرگ مردی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگی ام نشاند و فرشته ای که تار مویی

از او به پای من سیاه نماند

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش مرخدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، در قشاق. آفریدگاری که خویش را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در علم و معرفت یازماید.

بدین وسیله بر خود لازم میدانم که از زحمات اساتید فرزانه و فرهیخته‌ام جناب آقای دکتر «امین روشندل کاهو» و جناب آقای دکتر «محمدرداد» که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند و در این راه از هیچ زحمت و تلاشی دریغ نکردند و راهنمای راهم بودند و همچنین از جناب آقای مهندس «رسول انوری» و جناب آقای دکتر «مهرداد سلیمانی منفرد» که در امر مشاوره این پایان نامه بنده را مساعدت نموده و در این امر نهایت توجه، مراقبت و دقت خود را مبذول فرمودند کمال تشکر و قدردانی را به جا آورم و برای ایشان از خداوند منان سلامت و سعادت ابدی را خوانم.

در پایان هم از تمامی دوستان خوبم که در دوران تحصیل همواره یار و یاور من بودند و همچنین تک تک احضای خانواده‌ام که در فراز و نشیب این مسیر پشیمانم بودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعمدنامه

اینجانب **جواد مفاخری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه‌شناسی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه «تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تخمین مؤلفه رتبه پایین به روش تجزیه تانسوری چندمقیاسی» تحت راهنمایی دکتر امین روشندل کاهو و دکتر محمد رداد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

نوفه‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای به دو دسته کلی، نوفه‌های همدوس و نوفه‌های ناهمدوس (تصادفی) تقسیم‌بندی می‌شوند. نوفه‌های همدوس از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر دارای یک روند مشخص می‌باشند، درحالی‌که نوفه‌های تصادفی غیر همبسته بوده و از یک ردلرزه به ردلرزه دیگر دارای یک روند مشخص نمی‌باشند و به صورت نوسانات تصادفی در تمام طول زمان و فرکانس به همراه سیگنال اصلی منتشر می‌شوند. برای تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای و به دست آوردن داده نوفه‌زدایی شده به روش‌های پیشرفته و بهینه نیاز است. از ویژگی‌های الگوریتم‌های نوفه‌زدایی می‌توان به حفظ و بازیابی سیگنال مؤثر، تضعیف نوفه و زمان مناسب پردازش با حداقل تضعیف در رویدادهای لرزه‌ای و سیگنال‌های اصلی اشاره کرد، روش‌های مختلف نوفه‌زدایی کم و بیش از این ویژگی‌ها برخوردار می‌باشند. روش انقباض بهینه مقادیر تکین تانسوری (T-OSSVD) بسیاری از ویژگی‌های بیان شده را دارا می‌باشد ولی در استخراج مؤلفه رتبه پایین از داده‌های لرزه‌ای با نسبت سیگنال به نوفه پایین که در یک محیط با ساختار زیرسطحی پیچیده برداشت شده‌اند، ضعیف عمل می‌کند. در این پایان‌نامه عملکرد روش T-OSSVD با بهره گرفتن از تبدیل موجک پیوسته در الگوریتم استخراج مقادیر تکین تا حد قابل توجهی بهبود یافته است، روش تضعیف نوفه بر مبنای تبدیل موجک با ضریب بهینه شده در مقایسه با روش T-OSSVD عملکرد بهتری از خود نشان داده است. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، از دو نمونه داده مصنوعی و دو نمونه داده واقعی استفاده شده است و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از سه الگوریتم نوفه‌زدایی T-IBTSVT، T-OSSVD و BM4D از لحاظ کمی و کیفی مقایسه شده است که این مقایسه بیانگر عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر می‌باشد.

کلیدواژه: تضعیف نوفه تصادفی، حوزه زمان – فرکانس، تبدیل موجک پیوسته، انقباض بهینه، تجزیه
مقادیر تکین، ماتریس رتبه پایین

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- جواد مفاخری، امین روشندل کاهو، محمد رداد، رسول انوری، مهرداد سلیمانی منفرد

"تضعیف نوفه تصادفی در داده لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم T-OSSVD چندمقیاسی" اولین

همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک، شاهرود. <https://civilica.com/doc/970460>

2- Javad Mafakheri, Amin Roshandel Kahoo, Mohammad Radad, Rasoul Anvari, Mehrdad Soleimani Monfared. **Improving the T-OSSVD for Seismic Random Noise Attenuation by Mapping 3D Seismic Data to 4D Transformed Array Using CWT.** Journal of Digital Signal Processing

فهرست علائم

عنوان کامل به فارسی	عنوان کامل به لاتین	علامت اختصاری به لاتین
الگوریتم انقباض بهینه مقادیر تکین تانسوری	Tensor Optimal Shrinkage Singular Value Decomposition	T-OSSVD
تبدیل موجک پیوسته	Continuous Wavelet Transform	CWT
الگوریتم تطبیق بلوک ۴ بعدی	Block Matching 4D	BM4D
الگوریتم آستانه گذاری تکراری مقادیر تکین بلوک تانسوری	Iterative Block Tensor Singular Value Thresholding	IBTSVT
الگوریتم تحلیل قوی مؤلفه اساسی تانسور	Tensor Robust Principal Component Analysis	TRPCA
نسبت سیگنال به نوفه	Signal-to-Noise Ratio	SNR
الگوریتم تجزیه مُد تجربی	Empirical-Mode Decomposition	EMD
تبدیل فوریه زمان کوتاه	Short Time Fourier Transform	STFT
تبدیل موجک گسسته	Discrete Wavelet Transform	DWT
تحلیل مؤلفه اساسی	Principal Component Analysis	PCA
تجزیه مقادیر تکین تانسور	Tensor Singular Value Decomposition	T-SVD

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و کلیات ۱

- ۱-۱ تعریف مسئله..... ۲
- ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق..... ۳
- ۳-۱ پیشینه تحقیق..... ۴
- ۴-۱ هدف تحقیق..... ۱۴
- ۵-۱ ساختار پایان نامه..... ۱۵

فصل ۲: مبانی تئوری روش ۱۷

- ۱-۲ مقدمه..... ۱۸
- ۲-۲ پردازش سیگنال و حوزه‌های نمایش آن..... ۱۸
- ۳-۲ تبدیل موجک پیوسته..... ۱۹
- ۴-۲ تجزیه مقادیر تکین (SVD)..... ۲۲
- ۵-۲ رتبه در ماتریس‌های نوفه‌دار..... ۲۴
- ۶-۲ تخمین مؤلفه رتبه پایین با الگوریتم T-OSSVD..... ۲۶

فصل ۳: روش تحقیق ۳۱

- ۱-۳ مقدمه..... ۳۲
- ۲-۳ استخراج مؤلفه رتبه-پایین با الگوریتم پیشنهادی..... ۳۲

فصل ۴: ارزیابی روش ۴۱

- ۱-۴ مقدمه..... ۴۲

۴-۲ معیارهای ارزیابی روش پیشنهادی..... ۴۲

۴-۳ داده مصنوعی سه‌بعدی فاقد رویداد منحنی..... ۴۳

۴-۴ داده مصنوعی سه‌بعدی حاوی رویداد منحنی..... ۴۹

۴-۵ داده لرزه‌ای واقعی..... ۵۵

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۵

۵-۱ نتیجه‌گیری..... ۶۶

۵-۲ پیشنهادها..... ۶۷

مراجع ۶۸

فهرست جداول

جدول ۴-۱: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه روش پیشنهادی و سه روش مقایسه‌ای دیگر برای داده	
شکل ۴-۱ (ب).....	۴۶
جدول ۴-۲: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه روش پیشنهادی و سه روش مقایسه‌ای دیگر برای داده	
شکل ۴-۶ (ب).....	۵۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: سمت راست موجک، سمت چپ موج سینوسی [۶۹] ۲۰
- شکل ۲-۲: سیگنال ناپایا با مخلوطی از فرکانس‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ هرتز ۲۱
- شکل ۳-۲: اعمال تبدیل موجک پیوسته بر روی سیگنال ناپایا در شکل ۲-۲ با استفاده از موجک مادر مورلت ۲۲
- شکل ۱-۴: (الف) داده سه‌بعدی مصنوعی با دو رویداد خطی و شیب‌دار. (ب) داده سه‌بعدی مصنوعی که به نوفه تصادفی آغشته شده است. ۴۴
- شکل ۲-۴: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۱-۴ (ب) توسط روش‌های (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D ۴۵
- شکل ۳-۴: تفاضل بین داده نوفه‌ای در شکل ۱-۴ (ب) و داده بازیابی شده توسط روش‌های (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D ۴۷
- شکل ۴-۴: طیف دامنه میانگین داده بدون نوفه، نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۱-۴ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، IBTSVT، BM4D ۴۸
- شکل ۵-۴: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه خروجی برای روش پیشنهادی و سه روش مذکور با نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی در مثال شکل ۱-۴ ۴۹
- شکل ۶-۴: (الف) داده سه‌بعدی مصنوعی با رویداد خطی، شیب‌دار و منحنی. (ب) داده سه‌بعدی مصنوعی حاوی نوفه. ۵۰
- شکل ۷-۴: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده نوفه‌دار شکل ۶-۴ (ب) توسط چهار روش، (الف) روش پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D ۵۱
- شکل ۸-۴: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه خروجی برای روش پیشنهادی و سه روش مذکور با نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی در مثال شکل ۶-۴ (ب). ۵۳
- شکل ۹-۴: تفاضل بین داده نوفه‌ای در شکل ۶-۴ (ب) و داده بازیابی شده توسط روش‌های (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D ۵۴
- شکل ۱۰-۴: طیف دامنه میانگین داده بدون نوفه، نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۶-۴ و خروجی حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، IBTSVT و BM4D ۵۵
- شکل ۱۱-۴: داده برداشت شده از یک میدان نفتی در جنوب غرب ایران. ۵۶
- شکل ۱۲-۴: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۱۱-۴ توسط (الف) روش پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D ۵۷

شکل ۴-۱۳: تفاضل بین داده واقعی در شکل ۴-۱۱ و داده بازیابی شده توسط روش‌های، الف) پیشنهادی، ب) T-OSSVD، ج) IBTSVT، د) BM4D ۵۸
 شکل ۴-۱۴: طیف دامنه میانگین داده نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱۱ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، IBTSVT، BM4D ۵۹
 شکل ۴-۱۵: داده لرزه‌ای واقعی برداشت شده در یکی از میادین نفتی ۶۰
 شکل ۴-۱۶: نتایج اعمال روش‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۴-۱۵ توسط، الف) روش پیشنهادی، ب) T-OSSVD، ج) IBTSVT، د) BM4D ۶۱
 شکل ۴-۱۷: تفاضل بین داده واقعی نشان داده شده در شکل ۴-۱۵ و داده بازیابی شده توسط روش‌های، الف) پیشنهادی، ب) T-OSSVD، ج) IBTSVT، د) BM4D ۶۳
 شکل ۴-۱۸: طیف دامنه میانگین داده نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱۵ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش T-OSSVD، IBTSVT، BM4D ۶۴

فصل ۱ : مقدمه و کلیات

۱-۱ تعریف مسئله

علم ژئوفیزیک یک علم بین‌رشته‌ای است که شامل علوم فیزیک، زمین‌شناسی و ریاضی می‌باشد و با برداشت داده سروکار دارد. لرزه‌نگاری که یکی از زیرشاخه‌های علم ژئوفیزیک است، به منظور اکتشافات هیدروکربنی و شناسایی و مطالعه پوسته زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت لرزه‌نگاری با فرستادن امواج به داخل زمین و دریافت بازتابش این امواج از لایه‌های زیرسطحی توسط گیرنده‌ها اطلاعات را جمع‌آوری می‌کند. به صورت کلی علم ژئوفیزیک با استفاده از اطلاعات ژئوفیزیکی برداشت شده، خواص فیزیکی لایه‌های زیرسطحی را مشخص می‌کند [۱].

کیفیت داده‌های حاصل از برداشت لرزه‌نگاری در تفسیر و شناسایی دقیق ساختارهای زمین‌شناسی بسیار مؤثر است. این داده‌ها اغلب با انرژی‌های ناخواسته‌ای همراه هستند که از آن‌ها به عنوان نوفه^۱ یاد می‌شود. یکی از مراحل مهم در پردازش داده‌های لرزه‌ای تضعیف نوفه می‌باشد تا بتوان رویدادها و ساختارهای زیرسطحی را با بیشترین دقت به تصویر کشیده و تفسیر نمود. نوفه‌ها خود را به شکل‌های مختلف نشان می‌دهند که می‌توان آن‌ها را به دو گروه، نوفه‌های همدوس و نوفه‌های غیر همدوس (تصادفی)^۲ دسته‌بندی کرد. نوفه‌های همدوس را می‌توان در ردلرزه‌های مجاور ردیابی نمود، چون رفتار آن‌ها قابل پیش‌بینی است، به این معنی که این نوفه‌ها با سیگنال اصلی دارای همبستگی انرژی می‌باشند که می‌توان به نوفه‌های زمین‌غلت^۳، بازتاب‌های چندگانه^۴ و... اشاره نمود اما نوفه‌های تصادفی^۵ به صورت نوسانات تصادفی در تمام فرکانس‌ها و زمان‌ها مشاهده می‌شوند؛ از لحاظ انرژی با سیگنال اصلی همبستگی انرژی ندارند و از یک ردلرزه^۶ به ردلرزه دیگر قابل پیش‌بینی نبوده و هیچگونه نظم و ترتیبی در دامنه آن‌ها وجود ندارد، منابعی از قبیل بارش باران، مشکلات گیرنده‌ها،

^۱ Noise

^۲ Coherent and incoherent

^۳ Grand roll

^۴ Multiples

^۵ Random noise

^۶ Trace

فعالیت‌های انسان‌ها و حیوانات، رودخانه‌ها، وزش باد و ... باعث ایجاد نوفه‌های تصادفی می‌شوند [۳،۲].

۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

تضعیف نوفه‌ها باید قبل و پس از برانبارش و همچنین قبل از مهاجرت انجام شود. همان‌طور که مشاهده شد، وجود نوفه در برداشت‌های لرزه‌ای و تضعیف آن‌ها به یک مسئله چالش‌برانگیز تبدیل شده است. نوفه‌ها نقش حیاتی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای ایفا می‌کنند و چون منبع تولید این نوفه‌ها متفاوت است، نمی‌توان از یک یا چند روش خاص برای تضعیف تمامی نوفه‌ها استفاده کرد، بلکه باید با بهره بردن از روش‌های مختلف و خواص نوفه، روش‌های مناسبی که مطلوب‌ترین نتایج در تضعیف نوفه را ارائه می‌دهند، به کار گرفت. محققان همواره سعی در ارائه روش‌هایی داشته‌اند که با وجود ویژگی‌ها و شرایط مختلف نوفه‌های تصادفی، بیشترین توانایی تضعیف این نوفه‌ها را داشته باشند [۴]. برای ارائه یک روش نوفه‌زدایی کارآمد، نیاز است که تمامی خصوصیات و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه‌ای که برداشت لرزه‌ای در آن انجام شده است و همچنین سایر پارامترها و ویژگی‌های مؤثر بر نوفه‌های تصادفی به صورت کامل شناسایی و مورد توجه قرار گیرد، چراکه نوفه‌های تصادفی دریافت شده از محیط‌های جغرافیایی مختلف، ویژگی‌های متفاوتی را از خود نشان می‌دهند و هرچه زمین‌شناسی محیط برداشت پیچیده‌تر باشد، رفتار نوفه‌های دریافت شده نیز پیچیده‌تر خواهد بود و به روش‌های نوفه‌زدایی مؤثرتری برای نوفه‌زدایی نیاز است [۵]. در این پایان‌نامه سعی شده است با ارائه یک روش که بهبودیافته روش‌های قدیمی‌تر از خود است، بتوان نوفه‌های تصادفی را تا حد ممکن تضعیف نمود.

مراحل و شیوه برداشت داده‌های لرزه‌ای بر روی کیفیت داده‌ها بسیار مؤثر است و حضور نوفه باعث کاهش کیفیت داده‌ها می‌شود. یکی از مراحل مهم در پردازش داده‌های لرزه‌ای تضعیف نوفه‌های

تصادفی در رکوردهای لرزه‌ای است که بر روی داده‌های پیش از برانبارش^۱ و پس از برانبارش^۲ انجام می‌شود. روش‌های تضعیف نوفه در داده‌های لرزه‌ای در دو حوزه فیزیکی و تبدیلی قابل انجام است، در حوزه تبدیلی با انتقال سیگنال به یک حوزه دیگر و بهره بردن از اختلاف میان سیگنال اصلی و نوفه می‌توان نوفه و سیگنال اصلی را از هم تفکیک نمود، در این حوزه ضرایب مربوط به سیگنال اصلی حفظ و ضرایب مربوط به نوفه تضعیف و یا حذف می‌شوند و سپس داده عاری از نوفه به حوزه اصلی برگردانده می‌شود، همچنین می‌توان با به دست آوردن مدل نوفه و کم کردن آن از سیگنال نوفه‌ای، سیگنال پاک را به دست آورد؛ بنابراین طی دهه‌های گذشته روش‌های نوفه‌زدایی متنوعی ایجاد شده است [۲].

۳-۱ پیشینه تحقیق

روش‌های مختلفی برای تضعیف نوفه‌های تصادفی و بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از فیلتر فرکانسی میان‌گذر است، اما چون طیف فرکانسی سیگنال و نوفه باهم همپوشانی دارند با فیلتر کردن سیگنال، علاوه بر نوفه، بخشی از سیگنال پاک هم از دست می‌رود؛ بنابراین این روش برای تضعیف نوفه چندان مناسب نیست [۶]. روش دیگری که از خاصیت تصادفی بودن نوفه‌ها جهت تضعیف آن‌ها بهره می‌برد، روش برانبارش رکورد نقطه مشترک میانی است که با میانگین‌گیری از ردلرزه عمل می‌کند و در سال ۱۹۶۲ توسط مین^۳ معرفی شد [۷]. این روش توانایی چندان در تضعیف نوفه‌ها ندارد و در بسیاری از موارد پس از نوفه‌زدایی مقدار زیادی از نوفه در داده باقی می‌ماند و جزو روش‌های مطلوب برای نوفه‌زدایی محسوب نمی‌شود.

چون داده‌های لرزه‌ای قابل پیش‌بینی هستند، ولی نوفه‌های تصادفی غیرقابل پیش‌بینی‌اند، بر

^۱ Pre-stack

^۲ Post-stack

^۳ Mayne

همین اساس روش فیلتر پیشگو^۱ که در حوزه زمان - مکان و فرکانس - مکان قابل پیاده‌سازی است، در سال ۱۹۸۴ توسط کانالس^۲ پیشنهاد شد و به عنوان روشی جایگزین برای فیلتر میان‌گذر مورد استفاده قرار گرفت [۸]، این روش در صنعت مورد توجه واقع شد و دلیل آن پیاده‌سازی آسان این تکنیک بود. در این روش رویدادهای خطی و شبه خطی به صورت جمع جبری هارمونیک‌ها مشاهده می‌شوند و این روش قابلیت بازیابی رویدادهای خطی را دارد ولی در مورد رویدادهای شبه خطی ضعیف عمل می‌کند، همچنین این روش در داده‌های لرزه‌ای با نسبت سیگنال به نوفه پایین مناسب نیست و سیگنال بازیابی شده را دچار اعوجاج می‌کند و دامنه سیگنال را حفظ نمی‌کند [۹، ۸]. یک تبدیل دیگر که توسط هوانگ^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۹ ارائه شد، تبدیل هیلبرت-هوانگ^۴ (HHT) است که برای تحلیل داده‌های غیرخطی کارایی مناسب دارد و به صورت کلی یک روش تجربی محسوب می‌شود. این روش خود شامل دو بخش، تجزیه مد تجربی و روش تحلیل طیفی هیلبرت^۵ (HSA) است [۱۰]. ساچی و کوهل^۶ در سال ۲۰۰۱ یک مدل ARMA^۷ که از خواص یکسان سیگنال‌ها در حوزه فرکانس - مکان بهره می‌برند، برای نمایش سیگنال معرفی کردند [۱۲، ۱۱]. یک روش دیگر برای تضعیف نوفه روش تجزیه مد تجربی^۸ (EMD) است. روش تجزیه مد تجربی یک شیوه آنالیز است که باعث درک بهتر مفاهیم فیزیکی می‌شود. این روش با تجزیه سیگنال به تعدادی متناهی از توابع نوسانی که به آن‌ها توابع مُد ذاتی گفته می‌شود به تضعیف نوفه می‌پردازد [۱۵، ۱۴، ۱۳] که تاکنون چندین روش برای تضعیف نوفه‌های تصادفی با کمک این روش معرفی شده‌اند که سه روش، تجزیه مقادیر تکین^۹، تجزیه غیر پایا منظم^۱ و نسخه‌های بهبودیافته روش تجزیه

^۱ Prediction Filter

^۲ Canales

^۳ Huang

^۴ Hilbert-Huang Transform

^۵ Hilbert Spectral Analysis

^۶ Sacchi-Kuehl

^۷ Autoregressive moving average model

^۸ Empirical mode decomposition

^۹ Singular value decomposition

مد تجربی از جمله این روش‌ها می‌باشند [۱۷،۱۶]. ژانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۶ برای تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای از برازش چند جمله بهره بردند [۱۸].

دسته‌ای دیگر از روش‌های تضعیف نوفه بر اساس کاهش رتبه ماتریس داده عمل می‌کنند. اساس کار این روش‌ها بر این مبناست که ماتریس داده لرزه‌ای بدون نوفه ذاتاً رتبه پایین^۳ می‌باشد؛ در واقع طیف مقادیر تکین^۴ این ماتریس‌ها تُنک^۵ است و با اضافه شدن نوفه به داده لرزه‌ای رتبه ماتریس داده افزایش یافته و خود را به صورت مقادیر تکین کوچک در طیف مقادیر تکین نشان می‌دهد، به همین دلیل با کاهش رتبه ماتریس داده، نوفه موجود در داده نیز تضعیف می‌شود [۱۹]. اولریش^۶ در سال ۱۹۹۹ یک روش بر پایه تکنیک کاهش رتبه جهت تجزیه داده لرزه‌ای به مؤلفه‌های همدوس و غیر همدوس معرفی کرد. اساس کار این روش بدین صورت است که یک مقطع لرزه‌ای را به صورت یک ماتریس داده در نظر گرفته و با تجزیه مقادیر تکین، ویژه مقادیر آن را به دست آورده و با کاهش رتبه ماتریس، نوفه موجود در داده را تضعیف می‌کند [۱۹]. اولریش و فریر^۷ در سال ۱۹۸۸ کاهش رتبه ماتریس تصاویر لرزه‌ای را در حوزه زمان - مکان پیشنهاد دادند که از مزیت وابستگی خطی بین ردلرزه‌ها بهره می‌برد و برای بازیابی رویدادهای خطی عملکرد مطلوبی دارد، این روش تحت عنوان تجزیه تصویر ویژه^۸ شناخته شده است [۱۹]، در این روش به ازای هر مقدار ویژه یک ماتریس رتبه یک را به دست آورده و سیگنال اصلی از جمع هر کدام از این ماتریس‌های رتبه یک به دست می‌آید. چيو و هاوول^۹ [۲۰]، در سال ۲۰۰۸ و کری و زانگ^{۱۰} [۲۱]، در سال ۲۰۰۹ از روش تجزیه تصویر ویژه

^۱ Regularized non-stationary decomposition

^۲ Zhong

^۳ Low-Rank

^۴ Singular Spectrum

^۵ Sparse

^۶ Ulrych

^۷ Frier

^۸ Eigenimage

^۹ Chiu and Howell

^{۱۰} Cary and Zhang

برای تضعیف نوفه زمین‌غلت بهره بردند، به این صورت که امواج زمین‌غلت را با تصحیح برون‌راند خطی^۱ (LMO) افقی کرده و روش تجزیه تصویر ویژه را بر آن اعمال کردند [۲۱،۲۰]. روش‌های دیگر از جمله، تبدیل کارهونن - لاو^۲ [۲۲] و تحلیل مؤلفه اساسی^۳ برای تضعیف نوفه مورد استفاده قرار گرفتند [۱۹]. به صورت کلی روش‌های که در حوزه زمان - مکان رتبه را کاهش می‌دهند، فقط قادر به بازیابی رویدادهای بدون شیب در یک زمان بوده و در بازیابی رویدادهای شیب‌دار ناتوان هستند. ماری و گلن‌گود^۴ در سال ۱۹۹۰ روش‌های فیلتر کردن طیفی ماتریس را ارائه کردند که روش‌های کاهش رتبه مستقل از شیب هستند و نیازی به برون‌راند خطی ندارند، همچنین این روش‌ها در حوزه فرکانس - مکان عمل می‌کنند [۲۳]. جیمز کدزو^۵ در سال ۱۹۸۸ فیلتر کدزو را معرفی کرد، این فیلتر بر اساس کاهش مرتبه ماتریس برای تضعیف نوفه‌های تصادفی به کار برده شد. تریکت^۶ در سال ۲۰۰۲ فیلتر کدزو را در حوزه فرکانس - مکان بر روی مقطع لرزه‌ای دوبعدی اعمال کرد و کارایی مطلوب این فیلتر در تضعیف نوفه تصادفی را نشان داد [۲۵،۲۴]. همچنین تریکت در سال ۲۰۰۸ برتری فیلتر کدزو نسبت به روش‌های فیلتر پیش‌بینی $f - xy$ و تصویر ویژه را در تضعیف نوفه‌های تصادفی از مکعب لرزه‌ای به وسیله شکل دادن یک ماتریس هنکل^۷ نشان داد [۲۶]. روش‌های دیگر که بر اساس کاهش رتبه ماتریس نوفه را تضعیف می‌کردند با تشکیل ماتریس‌های معنادار باعث افزایش همبستگی سیگنال شدند. یکی از این روش‌ها که توسط آل بانگی^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۵ ارائه شد، روش تجزیه مقادیر تکین کوتاه شده نام گرفت که بر روی برش‌های زمانی داده کار می‌کند. در این روش هر برش زمانی را به صورت یک ماتریس هنکل که همبستگی سیگنال را افزایش داده نشان

^۱ Linear Move-Out

^۲ Karhunen-Loeve transform

^۳ Principal Component Analysis

^۴ Mari and Glangeaud

^۵ Cadzow

^۶ Trickett

^۷ Hankel

^۸ Al-Bannagi

می‌دهند [۲۷]. واتارد^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۲ روش تحلیل طیفی مقادیر تکین^۲ را معرفی کردند. اساس کار این روش بر این مبناست که ابتدا داده را به حوزه فرکانس - مکان برده و سپس هر برش فرکانسی را با یک ماتریس هنکل نمایش می‌دهد. این روش ابتدا در سیستم‌های دینامیکی به منظور تجزیه سری زمانی ظهور پیدا کرد [۲۹، ۲۸] و بعدها در زمینه‌های دیگری از قبیل پزشکی [۳۰] و غیره مورد استفاده قرار گرفت. ساچی در سال ۲۰۰۹ و تریکت در سال ۲۰۰۸ از این روش برای تضعیف نوفه تصادفی استفاده کردند [۳۱، ۲۵]. این روش در بازیابی رویدادهای خطی مطلوب عمل می‌کند ولی برای رویدادهای غیرخطی کارایی مناسبی ندارد. ماتریس‌های هنکل برای رویدادهای خطی ذاتاً رتبه پایین هستند و رتبه آن‌ها برابر با تعداد رویدادهای خطی موجود در داده می‌باشد. با اضافه شدن نوفه رتبه ماتریس‌ها بالا می‌رود، سپس با استفاده از روش‌های کاهش رتبه می‌توان مرتبه ماتریس را کاهش داده و نوفه موجود در داده را تضعیف کرد. در تمامی روش‌هایی که معرفی شد از دو حوزه زمان - مکان و فرکانس - مکان جهت تضعیف نوفه استفاده شد. در ادامه به بررسی روش‌هایی که در حوزه زمان - فرکانس نوفه را تضعیف می‌کنند پرداخته می‌شود.

به صورت کلی سیگنال‌ها به دو دسته پایا و ناپایا^۳ دسته‌بندی می‌شوند که اساس این تقسیم‌بندی تغییر محتوای فرکانسی متغیر با زمان سیگنال می‌باشد. در سیگنال‌های پایا محتوای فرکانسی با زمان تغییر نمی‌کند، درحالی‌که سیگنال‌های ناپایا محتوای فرکانسی آن‌ها با زمان تغییر می‌کند. هیچ روش نوفه‌زدایی نمی‌تواند به صورت کامل همه نوفه موجود در داده را حذف کند اما می‌توان با ترکیب انواع الگوریتم‌های موجود تا حد امکان نوفه موجود در داده را تضعیف نمود. نمایش زمان - فرکانس^۴ یک حوزه مناسب برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌های ناپایا است. عملکرد زمین به عنوان یک فیلتر

^۱ Vautard

^۲ Singular spectrum analysis

^۳ Stationary and non-stationary

^۴ Time-Frequency Representation

پایین‌گذر^۱ باعث می‌شود که سیگنال‌های لرزه‌ای محتوای فرکانسی متغیر با زمان داشته و از نوع سیگنال‌های ناپایا باشند، بنابراین حوزه زمان - فرکانس نمایش مناسبی برای سیگنال‌های لرزه‌ای ایجاد می‌کند [۶،۲]. در لرزه‌شناسی بیشتر سیگنال‌ها در حوزه زمان هستند یا به عبارتی تابعیت زمانی دارند. در این صورت نمی‌توان به تمام اطلاعات سیگنال دسترسی داشت، پس نیاز است که سیگنال در یک حوزه دیگر نمایش داده شود تا بتوان تحلیل بهتری بر روی سیگنال انجام داد و این کار با بسط سیگنال به وسیله یک مجموعه کامل توابع قابل انجام است. بسیاری از اطلاعات سیگنال در محتوای فرکانسی آن نهفته است، پس حوزه فرکانس، حوزه مناسبی جهت نمایش سیگنال است.

جوزف فوریه^۲ در قرن ۱۹ میلادی معادلات ریاضی حوزه فرکانس را ارائه داد که برای نشان دادن محتوای فرکانسی یک سیگنال از آن استفاده می‌شود. تبدیل فوریه^۳ در تحلیل سیگنال‌های ناپایا عملکرد مطلوبی ندارد و به دلیل ناپایا بودن سیگنال‌های لرزه‌ای نمی‌توان از این تبدیل برای تحلیل سیگنال لرزه‌ای بهره برد [۲]. برای حل این مشکل گابور^۴ در سال ۱۹۴۶ تبدیل فوریه زمان کوتاه^۵ را ارائه داد، این تبدیل از یک تابع تحلیلی که تابعی از فرکانس و زمان است، بهره می‌برد، به عبارتی اطلاعات زمانی و فرکانسی آن هم‌زمان نشان داده می‌شوند. در این روش می‌توان بخش کوچکی از یک سیگنال ناپایا را پایا فرض نموده و با پنجره‌ای کردن سیگنال می‌توان این بخش پایا را از کل سیگنال ناپایا استخراج نمود. این تبدیل به دلیل این که در حوزه زمان - فرکانس توزیع انرژی سیگنال را در صفحه زمان - فرکانس نشان می‌دهد، نمایش مناسبی را برای سیگنال‌های ناپایا ارائه می‌کند [۳۲]. روش دیگری که سیگنال را در حوزه زمان - فرکانس نشان می‌دهد، تبدیل موجک^۶ نام دارد که توسط

^۱ Low pass filter

^۲ Fourie

^۳ Fourier transform

^۴ Gabor

^۵ Short time Fourier transform

^۶ Wavelet transform

لرزه‌شناسی به نام مورلت^۱ در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. در این تبدیل به جای پنجره مورد استفاده در تبدیل فوریه زمان کوتاه از یک موجک مادر استفاده می‌شود، به این صورت که موجک در طول سیگنال منبسط و منقبض شده و در تمامی قسمت‌های سیگنال هم‌امیخت می‌شود [۳۴،۳۳]. تبدیل موجک شامل تبدیل موجک گسسته^۲ و تبدیل موجک پیوسته^۳ است [۳۵] و توانست تا حدودی ضعف تبدیل فوریه زمان کوتاه که در آن طول پنجره تحلیلی ثابت بود را برطرف کند و جایگزینی برای تبدیل فوریه زمان کوتاه محسوب می‌شود. عملکرد این تبدیل به این صورت است که برای بررسی فرکانس‌های بالاتر از پنجره تحلیلی با طول کوچک‌تر و برای بررسی فرکانس‌های پایین‌تر از پنجره تحلیلی با طول بزرگ‌تر (نوسان کمتر) استفاده می‌کند [۳۶]. تبدیل موجک گسسته در سال ۱۹۸۸ توسط میاو و چدل^۴ جهت تضعیف نوفه‌های تصادفی و زمین‌غلت مورد استفاده قرار گرفت [۳۷]. اوادفول^۵ و آلیانه^۶ در سال ۲۰۱۳ تبدیل موجک پیوسته و گسسته را برای تضعیف نوفه رکورد لرزه‌نگاری درون‌چاهی با دورافت صفر^۷ (VSP) مورد استفاده قرار دادند [۳۵]. از دیگر تبدیل‌های زمان - فرکانس می‌توان به تبدیل S^۸ [۳۸] و توزیع ویگنر - ویل^۹ [۳۹]، اشاره کرد، در توزیع ویگنر - ویل وجود جملات متقاطع^{۱۰} در توزیع باعث عملکرد ضعیف این تبدیل شده است [۳۹]. تبدیل S یا استاکول^{۱۱} از یک سری زمانی، یک نمایش زمان - فرکانس ایجاد می‌کند. این تبدیل مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه از تبدیل فوریه پنجره‌ای استفاده می‌کند ولی با این تفاوت که ابعاد پنجره زمان - فرکانس به فرکانس وابسته است. تبدیل S توانایی حفظ اطلاعات فازی را دارد و همچنین قدرت

^۱ Morlet

^۲ Discrete Wavelet Transform

^۳ Continuous Wavelet Transform

^۴ Miao and Cheddle

^۵ Ouadfeul

^۶ Aliouane

^۷ Vertical Zero Offset

^۸ S-transform

^۹ Wigner-Vill distribution

^{۱۰} Cross Terms

^{۱۱} Stockwell

تفکیک در تبدیل S همانند قدرت تفکیک در تبدیل موجک است، یکی از ضعف‌های این روش تمرکز انرژی ضعیف در بعضی وضعیت‌ها بخصوص فرکانس‌های بالا است [۳۸]. تبدیل‌های زمان - فرکانس^۱ به دو دسته اصلی تبدیل‌های زمان - فرکانس خطی^۲ و درجه دوم^۳ تقسیم‌بندی شده‌اند که این تقسیم‌بندی بر اساس رفتار تبدیل‌های زمان - فرکانس نسبت به سیگنال است [۴۰]. اگر در نمایش زمان - فرکانس اصل برهم‌نهی ترکیب خطی چند سیگنال برقرار باشد، تبدیل را خطی می‌گویند که این تبدیل‌ها دارای محاسبات ساده و قدرت تفکیک پایین هستند ولی در صورتی که اصل برهم‌نهی درجه دوم برقرار باشد، تبدیل را درجه دوم گویند و این تبدیل‌ها از قدرت تفکیک بالاتری نسبت به تبدیل‌های خطی برخوردارند [۲]. تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک از نوع تبدیل‌های خطی هستند که در تبدیل فوریه زمان کوتاه اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و یا وابسته بودن قدرت تفکیک به طول پنجره یکی از ضعف‌های این تبدیل است، به عبارتی نمی‌توان تشخیص داد که در یک سیگنال هر مؤلفه فرکانسی به طور دقیق در چه زمانی وجود دارد [۲]. دونوهو^۴ در سال ۱۹۹۶ برای حذف نوفه در پردازش سیگنال از آستانه گذاری نرم^۵ استفاده کرد و از مفهوم میانه برای تعیین مقدار آستانه بهره برد. آستانه گذاری در تبدیل موجک برای تضعیف نوفه مورد استفاده قرار گرفته و دارای دو نوع نرم و سخت^۶ می‌باشد [۴۲، ۴۱]. بوآشاش^۷ در سال ۲۰۰۳ فیلتر قله زمان - فرکانس^۸ را ارائه داد. عملکرد این فیلتر به این صورت است که سیگنال نوفه‌دار را به صورت سیگنال تحلیلی کدگذاری کرده و توزیع زمان - فرکانس آن را محاسبه می‌کند و سپس سیگنال بدون نوفه با انتخاب بیشینه فرکانس در توزیع زمان - فرکانس حاصل می‌شود [۴۳]. برخی دیگر از تبدیل‌های تُنک که داده لرزه‌ای را در یک حوزه

^۱ Time-Frequency Transform

^۲ Linear

^۳ Quadratic

^۴ Donoho

^۵ Soft Thresholding

^۶ Hard

^۷ Boashash

^۸ Time-Frequency Peak Filtering

تبدیلی تُنک نشان می‌دهند و برای تضعیف نوفه تصادفی استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از تبدیل سائزلت^۱ [۴۴]، تبدیل کنتورلت^۲ [۴۵]، تبدیل کرولت^۳ [۴۶]. تبدیل کرولت نسبت به تبدیل موجک تنک‌تر بوده و برای نمایش از ضرایب کمتری استفاده می‌کند، همچنین برای رویدادهای منحنی کاربرد مناسب‌تری دارد [۴۷]. بکوچه^۴ در سال ۲۰۱۴ برای تضعیف نوفه تصادفی از یک روش تحت عنوان آموزش لغت‌نامه^۵ بهره برد که در این روش مجموعه‌ای از اتم‌ها که همان نمایش تُنک سیگنال هستند، توسط داده نوفه‌دار آموزش دیده و با یک مسئله بهینه‌ساز نوفه را تضعیف می‌کند، این روش در تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای دوبعدی عملکرد مناسبی دارد [۴۸]. یکی دیگر از روش‌های تضعیف نوفه در داده‌های دوبعدی، آموزش لغت‌نامه با تنکی دو برابر^۶ (DSD) است که این روش سطح پایداری بیشتری را برای داده‌های لرزه‌ای ایجاد می‌کند [۴۹]. در سال ۲۰۱۷ نظری سیاه-سر^۷ و همکاران با ارائه یک روش بر اساس آموزش لغت‌نامه داده‌محور به نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای دوبعدی پرداختند، این روش داده بدون نوفه را به صورت ترکیب خطی از چند عنصر در یک لغت‌نامه در نظر می‌گیرد و از این طریق داده بدون نوفه را استخراج می‌کند [۵۰]. برخی دیگر از روش‌های نوفه‌زدایی با اعمال آستانه گذاری عمل می‌کنند و به ساخت یک مدل تقریبی با ویژگی‌های نوفه موجود در داده نیاز دارند، این روش‌ها در نوفه‌زدایی داده لرزه‌ای با سطح جزئی از نوفه تصادفی عملکرد مناسبی دارند، اما در نوفه‌زدایی داده‌های آغشته به نوفه زیاد، ضعیف عمل می‌کنند [۵۱، ۵۲]. یک روش دیگر که با حفظ رویدادهای لرزه‌ای و کنترل تفکیک‌پذیری به نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای می‌پردازد، روش فیلتر انتشار غیرخطی ناهمسانگرد است که یکی از روش‌های مؤثر در نوفه‌زدایی به حساب می‌آید، با این وجود، این روش در نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای برداشت شده از محیط‌های با

^۱ Seislet Transform

^۲ Contourlet Transform

^۳ Curvelet Transform

^۴ Bekouche

^۵ Dictionary Learning

^۶ Double-Sparsity Dictionary

^۷ Nazari Siah sar

زمین‌شناسی زیرسطحی پیچیده عملکرد ضعیفی دارد [۵۳] که این مشکل با ارائه روش‌های جدیدتری از قبیل روش تخمین مؤلفه رتبه پایین، انطباق بلوک سه‌بعدی و چهاربعدی، فیلتر قله زمان – فرکانس، آستانه گذاری مقادیر تکیین بلوک تانسوری و تجزیه مد تجربی تا حدودی برطرف شد [۵۴،۵۵،۵۶]. همچنین روش‌های که بر پایه تجزیه داده به مؤلفه رتبه پایین و تُنک عمل می‌کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۵۷]. یک روش برای افزایش قدرت تفکیک^۱ این تبدیل‌ها استفاده از تبدیل فشرده‌شده هم‌زمان^۲ و اعمال آن بر تبدیل‌های موجک، S و... است [۵۸،۵۹]. نظری سیاه‌سر و همکاران در سال ۲۰۱۶ بر مبنای الگوریتم گودک^۳ شبه نرم [۶۰] و تبدیل موجک فشرده‌شده هم-زمان به تجزیه داده لرزه‌ای به مؤلفه رتبه پایین و تُنک پرداختند [۶۱]، در این الگوریتم ماتریس تُنک با آستانه گذاری نرم و ماتریس رتبه پایین با تصویرسازی دوطرفه استخراج می‌شوند [۶۱]. انوری^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از تبدیل فرکانس – زمان به تخمین مؤلفه رتبه پایین و تُنک در داده‌های لرزه‌ای دوبعدی پرداختند، اساس این روش به این صورت است که ابتدا تبدیل فوریه زمان کوتاه داده لرزه‌ای آغشته به نوفه محاسبه می‌شود و سپس با در نظر گرفتن یک تابع زیان^۵، مؤلفه رتبه پایین و تُنک تخمین زده می‌شوند، تابع زیان در نظر گرفته شده با اعمال یک آستانه گذاری بر اساس انقباض بهینه^۶ حل می‌شود [۶۲]. انوری و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش تبدیل موجک فشرده‌شده هم‌زمان، مؤلفه رتبه پایین را تخمین زده و نوفه موجود در داده لرزه‌ای را تضعیف کردند، اساس این روش به این صورت بود که بردارهای تکیین^۷ ماتریس داده را به صورت بهینه وزن‌دار کرده و سپس مقادیر تکیین^۸ بهینه را تقریب زدند. این روش برای نوفه‌زدایی داده‌های دوبعدی عملکرد

^۱ Resolution

^۲ Synchrosqueezing Transform

^۳ Go-dec

^۴ Anvari

^۵ Loss Function

^۶ Optimum Shrinkage

^۷ Singular Vectors

^۸ Singular Values

مناسبی دارد، ولی در برداشت‌های سه‌بعدی که باید داده لرزه‌ای سه‌بعدی نوفه‌زدایی شود، این روش نمی‌تواند پاسخ مناسبی ارائه کند [۶۳]. برای حل این مشکل انوری و همکاران در سال ۲۰۱۸ الگوریتم T-OSSVD را برای نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی ارائه کردند که در این روش مؤلفه رتبه پایین بهتر استخراج شده و نوفه تصادفی تا حد زیادی تضعیف می‌شود [۶۴]. روش T-OSSVD تا حد زیادی زمان و خطای محاسبات در نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای را کاهش داد، با این حال روش مذکور در نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای برداشت شده در مناطق دارای زمین‌شناسی زیرسطحی پیچیده و همچنین داده‌های لرزه‌ای بزرگ‌مقیاس ضعیف عمل کرده و نمی‌تواند نوفه تصادفی در این نوع داده‌ها را به خوبی تضعیف کند.

۴-۱ هدف تحقیق

تمامی تبدیل‌های معرفی شده با دارا بودن مزیت‌های مختلف باز هم از قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی پایینی برخوردار هستند، بیشتر این روش‌ها در مواجهه با مدل‌های زمین‌شناسی پیچیده ضعیف عمل می‌کنند و ضمن تضعیف نوفه به سیگنال اصلی نیز آسیب وارد می‌کنند و اگر نسبت سیگنال به نوفه پایین باشد، نمی‌توانند به صورت مطلوب نوفه را تضعیف نمایند. در این پایان‌نامه یک استراتژی برای رفع نقصان در روش T-OSSVD ارائه شده است که این استراتژی در نوفه‌زدایی داده‌های بزرگ‌مقیاس که به درصد بالایی از نوفه آغشته هستند، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. در این پایان‌نامه هدف بر این است که مؤلفه‌های اساسی در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی که همان مؤلفه‌های رتبه پایین ماتریس داده می‌باشند، استخراج شوند؛ اما از آنجایی که داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در مقیاس بزرگی هستند و پردازش این داده‌های بزرگ‌مقیاس هزینه، زمان و دشواری بالایی به همراه دارند و همچنین تحلیل مؤلفه‌های اساسی در داده‌های بزرگ‌مقیاس با دشواری و میزان خطای بالایی همراه است، روش‌های مذکور در نوفه‌زدایی داده‌های بزرگ‌مقیاس ضعیف عمل کرده و با افزایش حجم داده‌ها توانایی و دقت این روش‌ها در پردازش و نوفه‌زدایی داده‌های بزرگ‌مقیاس کاهش

پیدا می‌کند، چرا که در داده‌های لرزه‌ای برای شناسایی مخازن هیدروکربنی دقت بالایی لازم است و اگر یک رویداد و یا شکستگی زیرسطحی به دلیل وجود نوفه در داده پردازش شده نادیده گرفته شود و یا نتوان آن را به خوبی شناسایی کرد، باعث اشتباه در دیگر مراحل تفسیر می‌شود و ضررهای اقتصادی و زمانی زیادی را به بار می‌آورد؛ بنابراین در این پایان‌نامه سعی شده است با ارائه یک روش که بهبود یافته روش‌های قدیمی‌تر است، بتوان داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس را با دقت بیشتری نوفه‌زدایی کرد و مؤلفه رتبه پایین را از این داده‌های بزرگ‌مقیاس استخراج نمود. همچنین در روش ارائه شده می‌توان داده‌های لرزه‌ای بزرگ‌مقیاس را به بلوک‌های کوچک‌تری تقسیم کرده و مؤلفه رتبه پایین را از این اجزا کوچک‌تر با اعمال عملگرهای آستانه گذاری روی مقادیر تکین مانند توابع جبران غیر محدب و یا روش‌های بهینه‌سازی مقادیر تکین [۶۵،۵۷] که از تجزیه تانسوری این بلوک‌ها حاصل می‌شود را به دست آورد. تخمین مؤلفه رتبه پایین در مقیاس‌های مختلف با توجه به تغییرات دامنه و محتوای فرکانسی، نسبت به تخمین مؤلفه رتبه پایین از کل داده عملکرد بهتری دارد.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، ابتدا در فصل دوم به تاریخچه تبدیل موجک و تجزیه مقادیر تکین و کاربرد آن‌ها در پردازش داده‌های لرزه‌ای پرداخته می‌شود. در فصل سوم با بهره بردن از این روش‌ها به معرفی یک روش جدید که بهبود یافته روش‌های قدیمی‌تر است و بر اساس تخمین مؤلفه رتبه پایین کار می‌کنند، پرداخته می‌شود. در فصل چهارم عملکرد روش پیشنهادی بر روی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس طبیعی و مصنوعی بررسی می‌شود و در نهایت در فصل پنجم به نتیجه‌گیری کلی در این پایان‌نامه و ارائه پیشنهادها پرداخته می‌شود.

فصل ۲: مبانی تئوری روش

۲-۱ مقدمه

در این فصل برای تجزیه و تحلیل روش پیشنهادی، نیاز است تا چندین روش موجود در پردازش سیگنال مورد مطالعه قرار گیرد، به همین دلیل ابتدا توضیحی در مورد سیگنال و حوزه‌های نمایش آن ارائه شده است و همچنین بنابه ویژگی‌های فرکانسی سیگنال و به کارگیری تبدیل موجک پیوسته در روش پیشنهادی، در این فصل به توضیح مختصری در مورد تبدیل موجک پیوسته پرداخته شده است که این تبدیل دارای نقاط قوت بیشتری نسبت به تبدیل فوری و تبدیل فوری زمان کوتاه است، سپس به بررسی روش تجزیه مقادیر تکین و درنهایت با بررسی شرایط کاهش رتبه ماتریس به تحلیل کامل روش انقباض بهینه و روش T-OSSVD پرداخته شده است.

۲-۲ پردازش سیگنال و حوزه‌های نمایش آن

امروزه پردازش سیگنال یکی از مباحث کاربردی و مهم در زمینه‌های مختلف علمی به شمار می‌رود، به گونه‌ای که در بسیاری از شاخه‌های علمی نیاز است، ابتدا بر روی داده‌ها یک سری عملیات انجام شود تا این داده‌ها بتوانند برای هدف مورد نظر به کار برده شوند. در پردازش سیگنال، استخراج سیگنال به همراه اطلاعات آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دو شیوه متداول نمایش یک سیگنال، نمایش زمان و نمایش فرکانس می‌باشند. در این دو نوع نمایش، سیگنال فقط به صورت تابعی از زمان و یا فرکانس نشان داده می‌شود و این دو شیوه نمایش به صورت هم‌زمان غیرمتمرکز می‌باشند [۲]. به طور معمول سیگنال‌ها در حوزه زمان ثبت می‌شوند. در نمایش زمانی اطلاعات مربوط به تمام بازه فرکانسی سیگنال موردنظر است، به عبارتی در نمایش زمانی یک سیگنال، قدرت تفکیک فرکانسی صفر می‌باشد، همچنین در نمایش فرکانسی سیگنال، قدرت تفکیک زمانی صفر می‌باشد، چرا که اطلاعات مربوط به تمام بازه زمانی مورد نظر است و نمی‌توان زمان را به صورت دقیق مشخص کرد. یک نمایش دیگر نمایش زمان - فرکانس می‌باشد که در این نمایش متغیرهای زمان و فرکانس دیگر

ناسازگار نمی‌باشند و به صورت هم‌زمان در نمایش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نمایش زمان - فرکانس، مقاطع عرضی^۱ فرکانس ثابت، زمان‌های که فرکانس در آن حضور دارند را نشان می‌دهند و مقاطع عرضی زمان ثابت نیز فرکانس‌های که زمان در آن حضور دارند را نشان می‌دهند [۲]. سری‌های زمانی را می‌توان با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال داد، این تبدیل برای سیگنال‌های پایا به خوبی عمل می‌کند، درحالی‌که برای سیگنال‌های ناپایا عملکرد مناسبی ندارد و زمان وقوع هر فرکانس را نشان نمی‌دهد. تبدیل فوریه زمان کوتاه تا حدودی این مشکل را برطرف نموده و تا حدی زمان وقوع هر فرکانس را نشان می‌دهد، انتخاب مناسب عرض تابع پنجره یکی از پارامترهای مؤثر در این روش است. به منظور عملکرد بهتر در تحلیل سیگنال لازم است که از تبدیل‌های زمان - فرکانس استفاده شود [۶۶،۲]. تبدیل‌های زمان - فرکانس مختلفی ارائه شده است که هر کدام از این تبدیل‌ها دارای ویژگی مخصوص به خود می‌باشند.

۲-۳ تبدیل موجک پیوسته

موجک برای اولین بار توسط دانشمندی به نام هار^۲ در سال ۱۹۰۹ میلادی معرفی شد [۳۲]. امروزه از موجک به عنوان ابزار مناسبی در ژئوفیزیک، ریاضیات، فیزیک و غیره بهره می‌گیرند. موجک‌ها برای استخراج اطلاعات فرکانسی از داده‌ها و تجزیه سیگنال به مؤلفه‌های فرکانسی آن به کار برده می‌شوند. موجک‌های دختر نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده از موجک مادر^۳ می‌باشند که موجک مادر یک تابع با طول متناهی و شدیداً میرا است [۶۷]. یک موجک مادر مانند $\Psi(t)$ که $\Psi(t) \in L^2(R)$ تابعی با انرژی محدود $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < +\infty$ و میانگین صفر $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$ است که مرکز آن در همسایگی $t = 0$ و به مقدار یک نرمال شده است. موجک‌ها در مقایسه با امواج سینوسی

^۱ Cross Section

^۲ Haar

^۳ Mother Wavelet

دارای انرژی محدود و نوسان آن‌ها متمرکز در اطراف یک نقطه می‌باشد، درحالی‌که امواج سینوسی دارای انرژی و گسترش نامحدود می‌باشند [۶۸].



شکل ۱-۲: سمت راست موجک، سمت چپ موج سینوسی [۶۹].

تبدیل موجک برای اولین بار توسط دانشمندی به نام مورلت^۱ در دهه ۱۹۸۰ مطرح شد. تبدیل موجک یک تبدیل انتگرالی است که از توابع پایه‌ای به نام موجک استفاده می‌کند و اصطلاحاً به این تبدیل، آنالیز با قدرت تفکیک چندگانه گفته می‌شود که سیگنال را در فرکانس‌های مختلف (مقیاس-های مختلف) با تفکیک‌پذیری متفاوت تحلیل می‌کند [۳۴]. در آنالیز چندتفکیکی با هر یک از مؤلفه‌های فرکانسی، رفتار متفاوتی انجام می‌شود، به این صورت که آنالیز چندتفکیکی برای فرکانس‌های بالا تفکیک‌پذیری زمانی مناسب ولی تفکیک‌پذیری فرکانسی نادقیقی را ارائه می‌کند و در فرکانس‌های پایین از تفکیک‌پذیری زمانی ضعیف و تفکیک‌پذیری فرکانسی مناسبی برخوردار است [۷۰]؛ بنابراین در اکثر سیگنال‌ها به‌ویژه سیگنال‌های لرزه‌ای و ناپایا و یا سیگنال‌هایی که مؤلفه‌های گذرای کوتاه مدتی دارند که در آن‌ها سیگنال مورد تحلیل دارای مؤلفه‌های فرکانسی پایین برای بازه‌های زمانی بلند مدت و مؤلفه‌های فرکانسی بالا در بازه زمانی کوتاه می‌باشد، با استفاده از تبدیل موجک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند [۷۰].

گرسمن^۲ با همکاری مورلت در سال ۱۹۸۲ به فرمول‌بندی تبدیل موجک پیوسته پرداختند. تبدیل موجک با اتساع و انتقال مجموعه‌ای از موجک‌ها به تجزیه سیگنال می‌پردازد [۷۱، ۳۶]. برای سیگنال $x(t)$ تبدیل موجک پیوسته سیگنال که تبدیل انتگرال موجک نیز نامیده می‌شود، به صورت

^۱ Morlet

^۲ Grossmann

رابطه (۱-۲) است.

$$W_x(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1-2)$$

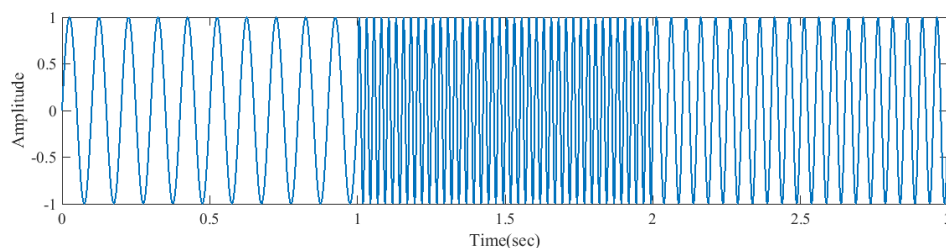
که در این رابطه عبارت $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ را نسخه مقیاس شده به اندازه a و انتقال یافته به اندازه b از موجک مادر $\psi(t)$ می‌نامند [۷۱].

تبدیل موجک پیوسته یک تبدیل معکوس پذیر است و انتقال از حوزه زمان - مقیاس به حوزه زمان مطابق رابطه (۲-۲) است، به شرطی که موجک مادر در رابطه (۳-۲) در شرط بازسازی تبدیل موجک صدق کند. در رابطه (۳-۲) عبارت $\hat{\psi}(f)$ تبدیل فوریه $\hat{\psi}(t)$ است [۷۱].

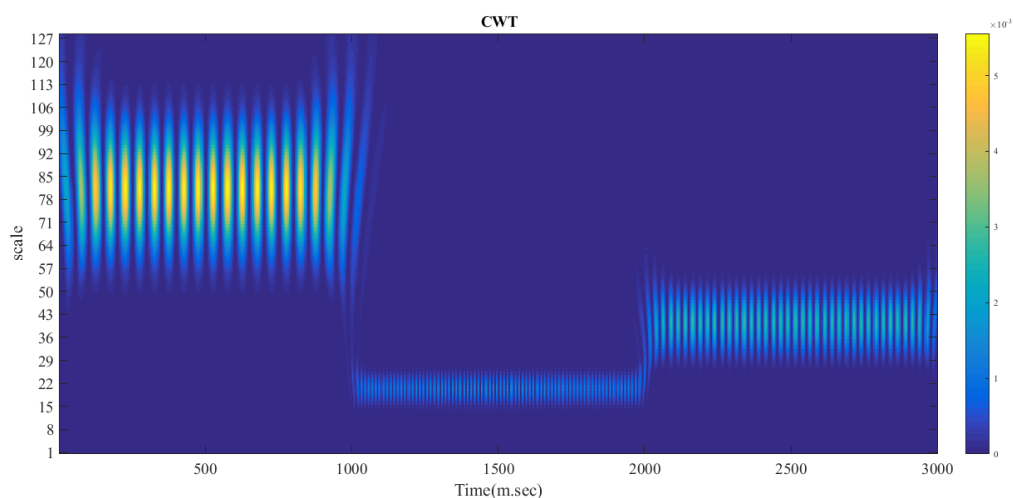
$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(b, a) |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2} \quad (2-2)$$

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (3-2)$$

در شکل ۲-۲ یک سیگنال ناپایا نشان داده شده است که این سیگنال مخلوطی از فرکانس‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ هرتز می‌باشد، تبدیل موجک پیوسته با موجک مادر مورلت بر روی این سیگنال ناپایا اعمال شده است و نتیجه حاصل در شکل ۳-۲ نشان می‌دهد که تبدیل موجک به دلیل انقباض و انبساط موجک مورد استفاده و حرکت بر روی سیگنال، تفکیک پذیری زمانی و فرکانسی مناسبی را ارائه می‌دهد.



شکل ۲-۲: سیگنال ناپایا با مخلوطی از فرکانس‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ هرتز.



شکل ۲-۳: اعمال تبدیل موجک پیوسته بر روی سیگنال ناپایا در شکل ۲-۲ با استفاده از موجک مادر مورلت.

۴-۲ تجزیه مقادیر تکین (SVD)

اگر فرض شود که ماتریس $Q_{m \times n}$ یک ماتریس با اندازه $m \times n$ است و همچنین $m \geq n$ باشد در این صورت می‌توان ماتریس Q را با استفاده از تجزیه مقادیر تکین به صورت رابطه (۴-۲) نوشت.

$$Q = U \Sigma V^T \quad (۴-۲)$$

در این رابطه عبارت $U_{m \times m} = [U_1 \dots U_m]$ و $V_{n \times n} = [V_1 \dots V_n]$ ماتریس‌های متعامد^۱ هستند که ستون‌های ماتریس $U_{m \times m}$ از بردارهای ویژه یکامتعامل^۲ متناظر با ماتریس مربعی QQ^T و ستون‌های ماتریس $V_{n \times n}$ از بردارهای ویژه یکامتعامل متناظر با ماتریس مربعی $Q^T Q$ تشکیل می‌شوند و $\Sigma_{m \times n}$ یک ماتریس قطری است که عناصر روی قطر آن ریشه دوم مقادیر ویژه غیر صفر ماتریس QQ^T می‌باشد، همچنین می‌توان آن را به صورت $\Sigma_Q = \sqrt{\sigma_{QQ^T}}$ نوشت و به عناصر روی قطر اصلی این ماتریس، مقادیر تکین ماتریس Q گفته می‌شود که به صورت رابطه (۵-۲) قابل بیان هستند.

^۱ Biorthogonal

^۲ Orthonormal

$$\begin{aligned}\Sigma_{m \times n} &= \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k) \\ k &= \min\{m, n\} \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > 0 \\ \sigma_{k+1} &= \dots = \sigma_{k+n} = 0\end{aligned}\tag{۵-۲}$$

در رابطه (۵-۲) عبارات σ_k و σ_1 به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقادیر ویژه غیر صفر ماتریس هستند و جملاتی که شامل مقادیر ویژه غالب‌تری هستند نقش بیشتری در ساخت ماتریس Q ایفا می‌کنند [۷۲]. رابطه (۴-۲) را می‌توان به صورت رابطه (۶-۲) نوشت که به عنوان نسخه کاهش یافته تجزیه مقادیر تکین^۱ معرفی شده است.

$$Q = U \bar{\Sigma} V^T = \sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_i u_i v_i^T \tag{۶-۲}$$

در رابطه (۶-۲) عبارت $\bar{\Sigma}$ ماتریس مقادیر تکین کاهش یافته را نشان می‌دهد، همان‌طور که در بالا ذکر شد، رتبه یک ماتریس برابر تعداد سطرها یا ستون‌هایی است که به صورت خطی مستقل هستند و بالاترین رتبه یک ماتریس برابر $\min\{m, n\}$ می‌باشد. در رابطه (۶-۲) عبارت $\bar{\sigma}_i$ بیانگر مقادیر تکین ماتریس Q بوده که تعدادی از این مقادیر تکین صفر شده‌اند و همچنین ابعاد ماتریس‌های U ، V و $\bar{\Sigma}$ به ترتیب برابر $m \times m$ ، $n \times n$ و $m \times n$ می‌باشند.

در حالت کلی رتبه یک ماتریس غیر مربعی، برابر تعداد مقادیر تکین غیر صفر ماتریس است، حال اگر فرض شود رتبه ماتریس Q برابر r و همچنین مقدار $r \leq n$ باشد، چون رتبه یک ماتریس در بیشترین حالت می‌تواند برابر $\min\{m, n\}$ باشد، پس ارتباط بین تجزیه مقادیر تکین یک ماتریس و تصویر ویژه‌های آن را می‌توان به صورت رابطه (۷-۲) نوشت.

$$Q = U \Sigma V^T = \sum_{i=1}^{r \leq \min\{m, n\}} \sigma_i u_i v_i^T = I_1 + I_2 + \dots + I_r \tag{۷-۲}$$

^۱ Thin SVD

در رابطه (۷-۲) مقادیر I_i که $i=1,2,\dots,r$ ماتریس‌های رتبه یک هستند که به عنوان تصویر ویژه شناخته می‌شوند [۷۳,۷۲].

حال می‌توان بیان کرد که تخمین نزدیک‌ترین تقریب از ماتریس رتبه پایین داده‌ها، یکی از کاربردهای تجزیه مقادیر تکین می‌باشد و این مسئله به صورت رابطه (۸-۲) قابل بیان است.

$$M_k = \mathcal{R}_k(M) = \arg \min_{\hat{M}} \|M - \hat{M}\|_F^2 \quad (۸-۲)$$

$$\text{rank}(\hat{M}) = k$$

در رابطه (۸-۲) عبارت $\|\cdot\|_F^2$ نرم فروبنیوس^۱ یک ماتریس است و به صورت

$$\|E\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |e_{ij}|^2}$$

قابل بیان است که $E \in \mathbb{R}^{m \times n}$ یک ماتریس غیر مربعی است [۷۴].

یک پاسخ بهینه برای کمینه کردن حداقل مربعات^۲ در رابطه (۸-۲) توسط اکارت و یانگ^۳ ارائه شد. این رابطه که توسط تجزیه مقادیر تکین بریده شده به دست آمده است، تحت عنوان نظریه اکارت – یانگ شناخته می‌شود که می‌توان آن را به شکل رابطه (۹-۲) فرمول‌بندی کرد که در این رابطه k رتبه ماتریس رتبه پایین می‌باشد [۷۵,۱۹].

$$M_k = U_k \Sigma_k V_k^T = \sum_{i=1}^{k \leq r} \sigma_i u_i v_i^T = I_1 + I_2 + \dots + I_{k \leq r} \quad (۹-۲)$$

۵-۲ رتبه در ماتریس‌های نوفه‌دار

داده لرزه‌ای بدون نوفه ذاتاً رتبه پایین است، این امر به دلیل وجود ساختارهای هندسی تکراری در داده بدون نوفه می‌باشد. با اضافه شدن نوفه به داده، رتبه ماتریس داده بالا می‌رود و نوفه خود را به

^۱ Frobenius Norm

^۲ Least-squares Minimization

^۳ Eckart and Young

صورت مقادیر تکین کوچک در طیف مقادیر تکین نشان می‌دهد. با اعمال یک سری پردازش‌ها بر روی داده نوفه‌دار می‌توان رتبه ماتریس داده را کاهش و ماتریس بدون نوفه را استخراج کرد. حال فرض شود یک ماتریس بزرگ X با ابعاد $m \times n$ در اختیار است. تا زمانی که هیچ نوفه‌ای به این ماتریس اضافه نشده باشد، این ماتریس رتبه پایین بوده و رتبه آن برابر r می‌باشد. با اضافه شدن نوفه به ماتریس X رتبه ماتریس بالا می‌رود. اگر نوفه اضافه شده به ماتریس X با Z نشان داده شود که واریانس^۱ آن برابر یک و میانگین عناصر این ماتریس صفر باشد و همچنین این عناصر به صورت مستقل و دارای یک توزیع یکسان در کل داده باشند، در این صورت ماتریس Y به صورت رابطه $Y = X + \delta Z$ نشان داده می‌شود، ماتریس Y همان ماتریس X می‌باشد که به آن نوفه تصادفی اضافه شده است [۷۴].

در این پایان‌نامه از روش تجزیه مقادیر تکین برای کاهش رتبه ماتریس استفاده شده است، به این صورت که انرژی همدوس ماتریس در چند ویژه مقدار اول آن قرار دارد و انرژی نوفه تصادفی اضافه شده به ماتریس به صورت یکنواخت بر روی تمام ویژه مقادیر ماتریس پخش می‌شوند. ماتریسی که با روش تجزیه مقادیر ویژه (SVD) به ماتریس رتبه پایینش تقریب زده می‌شود، همواره دارای نوفه کمتری بوده و به ماتریس بدون نوفه نزدیک‌تر است؛ بنابراین کاهش رتبه و تقریب رتبه پایین با روش تجزیه مقادیر ویژه یک ابزار مناسب برای تضعیف نوفه تصادفی می‌باشد که برای ماتریس Y به صورت رابطه (۱۰-۲) می‌باشد [۷۶].

$$Y = \sum_{i=1}^m y_i v_i \hat{v}_i' \quad (10-2)$$

در رابطه (۱۰-۲) عبارت $v_i \in \mathbb{R}^m$ بردار چپ و $v_i' \in \mathbb{R}^n$ بردار راست متناظر با مقادیر تکین y_i برای ماتریس Y می‌باشند. به ازای مقادیر $i=1,2,3,\dots,m$ در رابطه (۱۰-۲) با استفاده از روش تجزیه

^۱ Variance

مقادیر تکین کوتاه شده^۱ ماتریس رتبه پایین به صورت رابطه (۱۱-۲) تخمین زده می شود.

$$\hat{X}_r = \sum_{i=1}^r y_i v_i \tilde{v}_i' \quad (11-2)$$

عبارت r در رابطه (۱۱-۲) نشان دهنده مرتبه ماتریس X می باشد و فرض بر این است که این عبارت معلوم باشد، مقادیر تکین در این رابطه به صورت $y_1 \geq y_2 \geq y_3 \geq \dots \geq y_r$ می باشد [۷۴]. در رابطه (۱۱-۲) مقدار خطای میانگین مربعات^۲ (MSE) یا کاهش مربعات فروبنیوس^۳ می تواند به عنوان یک تابع زیان انتخاب شود. این عبارت باید کمترین مقدار خود را داشته باشد تا ماتریس تخمین زده شده درست ترین حالت خود را داشته باشد.

نرم فروبنیوس برای ماتریس X به صورت $\|X\|_F$ بیان می شود که به صورت $\|X\| = \sqrt{\sum_{i,j} m_{i,j}^2}$ تعریف می شود. تابع زیان فروبنیوس برای ماتریس بدون نوفه و ماتریس تخمینی به صورت رابطه (۱۲-۲) بیان می شود.

$$L_{m,n}^{fro} = \|X - \hat{X}\|_F^2 = \sum_{i,j} |x_{i,j} - \hat{x}_{i,j}|^2 \quad (12-2)$$

در رابطه (۱۲-۲) هدف این است که ماتریس تخمینی $\hat{X}$ با ماتریس بدون نوفه X که هم ماتریس تخمینی و هم ماتریس بدون نوفه دارای ابعاد $m \times n$ هستند، کمترین خطای میانگین مربعات را با هم داشته باشند [۷۴].

۲-۶ تخمین مؤلفه رتبه پایین با الگوریتم T-OSSVD

داده لرزه ای در دو حوزه اصلی و انتقالی از ویژگی ذاتی رتبه پایین بودن برخوردار بوده و همین

^۱ Truncated Singular Value Decomposition

^۲ Mean Square Error

^۳ Square Frobenius Loss

ویژگی باعث ایجاد روش‌های نوفه‌زدایی متعددی بر اساس رتبه ماتریس شده است. الگوریتم T-OSSVD نیز یکی از این روش‌هاست که با به کارگیری ویژگی رتبه پایین بودن سیگنال‌های لرزه‌ای به نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای پرداخته است. عملکرد این الگوریتم بر مبنای تجزیه داده لرزه‌ای به مؤلفه رتبه پایین و مؤلفه تُنک می‌باشد که مؤلفه رتبه پایین همان سیگنال‌های اصلی داده لرزه‌ای هستند و مؤلفه تُنک نوفه موجود در داده را نشان می‌دهد [۶۴]. مراحل عملکرد این الگوریتم به صورت خلاصه به این صورت است که ابتدا داده لرزه‌ای را به صورت تانسور در نظر گرفته و سپس برای استخراج مقادیر تکین موردنظر از روش TRPCA که بهبودیافته روش PCA است، استفاده می‌کند. در روش TRPCA موردنظر، یک نسخه بهبودیافته از T-SVD که انقباض بهینه را به کار می‌گیرد، بر روی مقادیر تکین اعمال می‌شود. بازایی مؤلفه رتبه پایین از داده نوفه‌دار با استفاده از انقباض بهینه مقادیر تکین یکی از روش‌های رایج برای نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. در روش T-OSSVD ماتریس رتبه پایین X با اندازه $m \times n$ که به ماتریس نوفه Z آغشته شده باشد، به صورت $Y = X + Z$ نشان داده شده است. در این الگوریتم هدف تخمین مقدار $\hat{X}$ از روی X با انتخاب تابع زیان $L_{m,n}(\cdot, \cdot)$ است که این تابع زیان باید کمینه شود تا مقدار قابل قبول برای $\hat{X}$ به دست آید. نسخه بهبود یافته از T-SVD که به عنوان T-OSSVD نام‌گذاری شده است، برای تخمین مؤلفه رتبه پایین، ماتریس X و Y را به صورت روابط (۲-۱۳) و (۲-۱۴) بازنویسی می‌کند.

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^r y_i v_i \tilde{v}_i' \quad (2-13)$$

$$Y = \sum_{i=1}^m y_i v_i \tilde{v}_i' \quad (2-14)$$

در روابط بالا مقادیر v_i ، v_i' و y_i به ترتیب بردارهای راست و چپ و مقادیر متناظر با این بردارها را نشان می‌دهند. الگوریتم T-OSSVD، یک ضریب را که به صورت رابطه $\eta: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ تعریف شده است، بر روی مقادیر تکین اعمال می‌کند که به عنوان ضریب انقباض بهینه شناخته می‌شود. این ضریب تعدادی از مقادیر تکین را به سمت صفر میل داده و مابقی را بدون تغییر باقی می‌گذارد. با

اعمال این ضریب بر روی مقادیر تکین، رابطه (۲-۱۴) به صورت رابطه (۲-۱۵) بازنویسی می‌شود [۷۴، ۶۴].

$$\hat{X}_\eta = \sum_{i=1}^m \eta(y_i) v_i \tilde{v}_i' \quad (۲-۱۵)$$

همچنین در این الگوریتم از نرم اپراتور به عنوان تابع زیان استفاده شده است که به صورت رابطه (۲-۱۶) عمل می‌کند و در این رابطه عبارت $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ مقادیر تکین ماتریس $X - \tilde{X}$ را نشان می‌دهند.

$$L_{m,n}^{op}(X, \tilde{X}) = \|X - \tilde{X}\|_{op} = \max(\sigma_1, \dots, \sigma_m) \quad (۲-۱۶)$$

گاویش و دونوهو^۱ در سال ۲۰۱۷ تحقیقات زیادی را برای تعیین مقدار ضریب انقباض بهینه بر روی سطح‌های مختلف از نوفه انجام دادند و در نهایت به رابطه (۲-۱۷) دست پیدا کردند که در این رابطه عبارت y مقادیر تکین و β نسبت ابعادی را نشان می‌دهند، همچنین مقدار β به صورت $0 < \beta \leq 1$ تعریف شده است و در این الگوریتم مقدار $\beta = 1$ در نظر گرفته می‌شود، این مقدار از طریق تجربه به دست آمده که در این حالت بهترین عملکرد الگوریتم برای نوفه‌زدایی ارائه می‌شود [۷۴].

$$\eta_y^* = \begin{cases} 0 & \text{if } y \leq 1 + \sqrt{\beta} \\ \frac{1}{y} \sqrt{(y^2 - \beta - 1) - 4\beta} & \text{if } y \geq 1 + \sqrt{\beta} \end{cases} \quad (۲-۱۷)$$

به صورت کلی الگوریتم T-OSSVD در سه مرحله انجام می‌شود.

مرحله اول:

داده لرزه‌ای سه‌بعدی به صورت تانسور در نظر گرفته می‌شود و با در نظر گرفتن یک سری شرایط

^۱ Gavish and Donoho

برای تانسور می‌توان آن را به مؤلفه رتبه پایین و تُنک به صورت $T_p = L_p + S_p$ تجزیه کرد که L_p مؤلفه رتبه پایین و S_p مؤلفه تُنک را نشان می‌دهند.

مرحله دوم:

بر روی بعد سوم یا بعد زمانی تانسور مورد نظر تبدیل فوریه سریع اعمال می‌شود که با این کار تانسور مورد نظر به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود، در این حوزه تجزیه مقادیر تکین (SVD) بر روی هر ردلرزه به صورت مجزا اعمال می‌شود تا مقادیر تکین و بردارهای راست و چپ متناظر با این مقادیر تکین حاصل شود و سرانجام بر روی این مقادیر تکین یک ضریب انقباض بهینه اعمال شده و مؤلفه رتبه پایین استخراج می‌شود. نُرم صفر این وزن‌های اعمال شده بر مقادیر تکین برابر با رتبه‌ای است که برای تخمین ماتریس سیگنال رتبه پایین مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این که این ضرایب بهینه باشند، نیاز است که مربعات خطا بین سیگنال تخمین زده شده و اصلی کمینه شود. در این الگوریتم نُرم اپراتور به عنوان تابع زیان انتخاب شده و ضریب انقباض بهینه متناظر با این نُرم به صورت رابطه (۲-۱۷) می‌باشد.

مرحله سوم:

در این الگوریتم تمامی مراحل بالا برای استخراج مؤلفه رتبه پایین تا حاصل شدن خطای مورد نظر تکرار می‌شوند [۶۴].

شروع

- ۱- ورودی: داده لرزه‌ای سه‌بعدی به صورت تانسور در نظر گرفته می‌شود $B \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$
- ۲- تبدیل فوریه سریع را بر روی بعد سوم تانسور اعمال کن $D \leftarrow \text{fft}(B, [], 3)$
- ۳- برای $i=1$ to n_3 انجام بده
- ۴- تجزیه مقادیر تکین را اعمال کن $[U, S, D] = \text{svd}(D(:, :, i))$
- ۵- ضریب انقباض بهینه را بر روی مقادیر تکین اعمال کن $S = \text{Optimal} - \text{Shrinkage}(s)$
- ۶- مقادیر $\hat{u}(:, :, i) = U$ و $\hat{s}(:, :, i) = S$ و $\hat{v}(:, :, i) = V$ محاسبه کن
- ۷- معکوس تبدیل فوریه سریع را اعمال کن $u \leftarrow \text{ifft}(\hat{u}, [], 3)$ و $s \leftarrow \text{ifft}(\hat{s}, [], 3)$ و $v \leftarrow \text{ifft}(\hat{v}, [], 3)$
- ۸- مقادیر $u_n \leftarrow u$ و $s_n \leftarrow s$ و $v_n \leftarrow v$ را محاسبه کن
- ۹- تا حاصل شدن مقدار $\|s_n - s\|_F / \|s\|_F \leq \varepsilon$ مراحل بالا را تکرار کن
- ۱۰- خروجی: $L_p = u_n * s_n * v_n^T$

تمام

الگوریتم ۱: استخراج مؤلفه رتبه پایین با استفاده از روش T-OSSVD و به‌کارگیری انقباض بهینه [۶۴].

فصل ۳: روش تحقیق

۳-۱ مقدمه

برای نوفه‌زدایی مطلوب در داده‌های لرزه‌ای باید روش‌هایی به کار گرفته شوند که بهترین عملکرد را در تضعیف نوفه و بازیابی کامل سیگنال‌های اصلی داشته باشند. روش‌های پردازشی زیادی برای داده‌های سه‌بعدی توسعه یافته‌اند، داده‌های لرزه‌ای در دو حوزه اصلی و تبدیلی از ویژگی رتبه پایین بودن داده بدون نوفه بهره می‌برند. دو استراتژی اصلی که برای تضعیف نوفه تصادفی مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت؛ (۱) کاهش رتبه ماتریس داده، (۲) تجزیه به مؤلفه رتبه پایین و مؤلفه تُنک می‌باشند که در این پایان‌نامه از استراتژی دوم استفاده می‌شود [۷۷، ۶۱] و برای جداسازی مؤلفه رتبه پایین و تُنک از یک داده آغشته به نوفه از روش‌های متنوعی از قبیل روش RPCA و روش گُودک استفاده می‌شود [۶۰، ۷۸]. در این پایان‌نامه از روش RPCA برای جداسازی مؤلفه رتبه پایین و تُنک استفاده شده است و همچنین با به‌کارگیری تبدیل‌های زمان - فرکانس و بهره‌مندی از ویژگی-های این حوزه، کارایی روش T-OSSVD بهبود داده شده است.

۳-۲ استخراج مؤلفه رتبه-پایین با الگوریتم پیشنهادی

روش تحلیل مؤلفه اساسی (PCA) یکی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده برای داده‌های دوبعدی می‌باشد و روش بهبود یافته آن RPCA روشی مؤثر در تجزیه ماتریس‌ها محسوب می‌شود که ماتریس دوبعدی، $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$ را به صورت $A = L_0 + S_0$ به مؤلفه رتبه پایین و تُنک تجزیه می‌کند که می‌توان آن را به صورت رابطه (۳-۱) نوشت [۷۹، ۸۰].

$$\min_{L_0, S_0} \|L_0\|_* + \lambda \|S_0\|_{1,1,2} \quad (۳-۱)$$

در رابطه (۳-۱) عبارت λ به صورت $\lambda = \frac{1}{\sqrt{\max(n_1, n_2)}}$ و L_0 مؤلفه رتبه پایین و S_0 مؤلفه

تُنک ماتریس بوده و همچنین عبارت $\|L_0\|_*$ و $\|S_0\|_1$ به ترتیب نشان دهنده نُرم هسته‌ای و نُرم ℓ_1

می‌باشند، مقدار عبارت $\|S_0\|_{1,1,2}$ به صورت $\|S_0\|_{1,1,2} = \sum_{i,j} \|S_0(i, j, :)\|_F$ تعیین می‌شود [۶۴].

وقتی که داده لرزه‌ای به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود، تخمین یک رتبه مناسب برای آن داده سه‌بعدی دشوار است، بنابراین روش‌هایی که برای بازیابی ماتریس رتبه پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند را می‌توان به داده‌های با ابعاد بالاتر نیز تعمیم داد. روش TRPCA برای داده‌های با ابعاد بالا (سه‌بعدی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، این روش با تقسیم داده سه‌بعدی اصلی به بلوک‌های سه-بعدی کوچک‌تر مؤلفه رتبه پایین و تُنک هر بلوک را به صورت جداگانه استخراج می‌کند [۸۱، ۷۹]. به طور مشابه اگر داده لرزه‌ای سه‌بعدی $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ را در نظر بگیریم، می‌توان آن را با شرایط ساختارهای هندسی تکراری به مؤلفه رتبه پایین $L \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ و مؤلفه تُنک $S \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ تجزیه کرد که به صورت رابطه (۲-۳) می‌باشد.

$$A = L + S \quad (2-3)$$

روش‌های مختلفی مانند تجزیه CP^۱ که تانسور را به مؤلفه‌های رتبه یک تجزیه می‌کند [۸۲] و تجزیه تاکر^۲ که به وسیله رتبه ماتریس محاسبه می‌شود [۸۳]، برای به دست آوردن مؤلفه رتبه پایین از تانسور مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش تجزیه مقادیر ویژه تانسوری (T-SVD) با استفاده از تبدیل فوریه در طول بعد سوم از تانسور $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ ، تانسور مورد نظر را از مختصات $t-x-y$ به مختصات $f-x-y$ انتقال می‌دهد [۶۴] که در این صورت تانسور $B \in \mathbb{C}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ به صورت رابطه (۳-۳) حاصل می‌شود.

$$B = M + N \quad (3-3)$$

در رابطه (۳-۳) عبارت $M \in \mathbb{C}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ و $N \in \mathbb{C}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ مؤلفه‌های رتبه-پایین و تُنک هستند که تبدیل فوریه در طول بعد سوم آن‌ها اعمال شده است. اگر تجزیه مقادیر تکین بر روی i برش فرکانسی از

^۱ Canonical Polyadic Decomposition

^۲ Tucker Decomposition

تانسور انتقال داده شده به حوزه فرکانس اعمال شود، می‌توان تانسور $B(:, :, i)$ را به صورت رابطه (۴-۳) نوشت [۸۴].

$$B(:, :, i) = \sum_{i=1}^r s_i u_i v_i^T + Y = X + Y \quad (۴-۳)$$

در رابطه (۴-۳) عبارت u_i و v_i بردارهای تکین متناظر با مقادیر تکین s_i حاصل از تجزیه مقادیر تکین مؤلفه رتبه پایین $X \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$ هستند، همچنین مقدار عبارت r نشان دهنده رتبه ماتریس رتبه پایین است و به صورت $r \leq \min(n_1, n_2)$ قابل بیان می‌باشد، ماتریس $Y \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$ بیانگر مؤلفه تُنک است و نماد T ترانهاده یک ماتریس را نشان می‌دهد.

در روش متداول T-SVD برای استخراج مؤلفه رتبه پایین، برخی از مقادیر تکین تانسور $B(:, :, i)$ به سمت صفر و مابقی بدون تغییر باقی می‌مانند که می‌توان آن را به صورت رابطه (۵-۳) نوشت.

$$\hat{M}(:, :, i) = \hat{X} = \sum_{i=1}^{\hat{r}} \sigma_i p_i q_i^T \quad (۵-۳)$$

در رابطه (۵-۳) مقادیر p_i و q_i بردارهای تکین متناظر با مقادیر تکین σ_i هستند و نماد $\hat{\cdot}$ بر روی هر متغیر نشان دهنده مقدار تخمینی برای آن متغیر است. در انتها نیز با اعمال معکوس تبدیل فوریه بر روی بعد سوم تانسور $\hat{M}$ مؤلفه رتبه پایین از داده سه‌بعدی در حوزه $t-x-y$ تخمین زده می‌شود [۸۴]. روش T-OSSVD همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با اعمال یک سری ضرایب بهینه بر روی مقادیر تکین سعی در تخمین مؤلفه رتبه پایین دارد.

تبدیل تُنک معمولاً کارآمدترین و متمایزترین نمایش را در بین حوزه‌های تبدیلی دارد، بنابراین روش‌های نوفه‌زدایی مبتنی بر تبدیل تُنک به طور گسترده‌ای در پردازش داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این پایان‌نامه با سه تغییر عمده که در روش T-OSSVD انجام گرفته است، کارایی روش T-OSSVD برای تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای تا حد قابل قبولی بهبود یافته است. اولین بهبود در روش T-OSSVD به این صورت است که با در نظر گرفتن داده

لرزه‌ای سه‌بعدی به صورت تانسور و همچنین تقسیم داده به بلوک‌های کوچک‌تر و هم‌اندازه، تجزیه مقادیر تکین و تخمین مؤلفه رتبه پایین از داده اصلی دقیق‌تر انجام شده است. دومین ویژگی روش پیشنهادی جایگزین کردن تبدیل موجک پیوسته با رابطه $W_x(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$ به جای تبدیل فوریه استفاده شده در روش T-OSSVD می‌باشد که با این کار داده مورد نظر از حوزه $t-x-y$ به حوزه $f-t-x-y$ منتقل می‌شود و چون داده‌های لرزه‌ای غالباً ناپایا بوده و محتوی فرکانسی متغییر با زمان دارند، بنابراین انتظار می‌رود با اعمال تبدیل موجک پیوسته به جای تبدیل فوریه بتوان از ویژگی ناپایا بودن سیگنال‌های لرزه‌ای بیشتر بهره گرفت و داده‌های لرزه‌ای را بهتر پردازش نمود. به صورت کلی تبدیل موجک پیوسته از سیگنال $A(t)$ با استفاده از یک سری مقیاس‌ها و انتقال‌ها به دست می‌آید که قبلاً در مورد آن توضیحات کافی ارائه شده است [۷۰، ۸۴]. از دیگر برتری‌های روش پیشنهادی نسبت به روش T-OSSVD می‌توان به نحوه وزن‌دهی و انقباض مقادیر تکین و بردارهای چپ و راست در روش پیشنهادی اشاره کرد، استراتژی استفاده شده برای آستانه گذاری و وزن‌دهی بهینه به مقادیر تکین و بردارهای راست و چپ در روش پیشنهادی با حل مسئله بهینه در رابطه (۶-۳) انجام شده است.

$$\hat{w}^{opt} := \arg \min_{\|w\|_0=r} (SE(\hat{w}))$$

$$SE(\hat{w}) = \|X - \sum_i \hat{w}_i p_i q_i^T\|_F^2 \quad (6-3)$$

تجزیه و تحلیل نشان داده است که $\hat{w}^{opt}$ به صورت عملگر انقباض - آستانه گذاری بر روی مقادیر تکین حاصل از تانسور نوفه‌دار $B(:, :, i)$ عمل می‌کند. در واقع مسئله بهینه‌ای که در رابطه (۶-۳) به کار گرفته شده است به ماتریس ناشناخته‌ای که سعی در تخمین آن داریم بستگی دارد. ماتریس سیگنال و ماتریس نوفه به این صورت در نظر گرفته شده‌اند که ماتریس سیگنال همواره رتبه پایین و ماتریس نوفه تُنک می‌باشد و در بهینه‌سازی انجام گرفته در رابطه (۶-۳) از ویژگی رتبه پایین بودن ماتریس سیگنال بهره گرفته شده است و در این رابطه کوچک‌ترین مقادیر تکین برای ماتریس

X به عنوان رتبه تخمین زده شده در نظر گرفته می‌شود. از این‌رو، الگوریتم مورد استفاده در این پایان‌نامه تخمینی از رتبه ماتریس سیگنال را به عنوان ورودی خود در نظر می‌گیرد و با ارائه یک تقریب وزنی بهینه شده تا حد زیادی اثر تخمین رتبه را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۴ ناداکودیتی یک راه‌حل تقریبی مناسب را برای رابطه (۶-۳) به صورت رابطه (۷-۳) ارائه داد [۸۴، ۶۴].

$$\hat{W}_{i,\hat{r}}^{opt} = -2 \frac{D(\hat{\sigma}_i; \hat{\Sigma}_{\hat{r}})}{D'(\hat{\sigma}_i; \hat{\Sigma}_{\hat{r}})}, i=1, 2, \dots, \hat{r} \quad (۷-۳)$$

که در این رابطه عبارت $\hat{\sigma}_i$ نشان‌دهنده بزرگ‌ترین مقادیر تکیین مربوط به رتبه مؤثر می‌باشد و عبارت $\hat{\Sigma}_{\hat{r}} = diag(\hat{\sigma}_{r+1}, \dots, \hat{\sigma}_l)$ نشان می‌دهد ماتریس $B(:, :, i)$ دارای l مقدار تکیین می‌باشد همچنین نماد D شاخصی برای تبدیل D - و نماد D' مشتق تبدیل D - می‌باشند که به صورت رابطه (۸-۳) قابل بیان است، همچنین در رابطه (۸-۳) عبارت z دارای مقدار ثابت و ماتریس C به صورت $C \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2}$ می‌باشد [۸۴].

$$\begin{aligned} D(z; C) &= \frac{1}{n_1} \text{Tr} \left[z(z^2 I - CC^T)^{-1} \right] \cdot \frac{1}{n_2} \text{Tr} \left[z(z^2 I - C^T C)^{-1} \right] \\ D'(z; C) &= \frac{1}{n_1} \text{Tr} \left[z(z^2 I - CC^T)^{-1} \right] \cdot \frac{1}{n_2} \text{Tr} \left[-2z^2 (z^2 I - C^T C)^{-2} + (z^2 I - C^T C)^{-1} \right] \\ &+ \frac{1}{n_2} \text{Tr} \left[z(z^2 I - C^T C)^{-1} \right] \cdot \frac{1}{n_1} \text{Tr} \left[-2z^2 (z^2 I - CC^T)^{-2} + (z^2 I - CC^T)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (۸-۳)$$

مراحل انجام شده در این پایان‌نامه به صورت زیر است

- ۱- در نظر گرفتن داده لرزه‌ای سه‌بعدی به صورت تانسور.
- ۲- اعمال بلوک‌بندی و تجزیه تانسور به بلوک‌های کوچک‌تر و هم‌اندازه.
- ۳- ارائه یک نسخه بهبود یافته از T-SVD.
- ۴- تجزیه داده به مقادیر تکیین و بردارهای تکیین.
- ۵- آستانه گذاری و اعمال وزن‌های بهینه در حوزه تبدیل موجک و در طول بعد سوم بر روی مقادیر تکیین و بردارهای چپ و راست به دست آمده.

استخراج مؤلفه رتبه پایین از داده‌های بزرگ مقیاس به مراتب سخت‌تر از استخراج مؤلفه رتبه پایین از داده‌های با سایز کوچک است، در الگوریتم T-OSSVD و الگوریتم پیشنهادی محاسبه انحراف معیار (SD)^۱ نوفه به صورت خودکار از خود داده نوفه‌دار انجام می‌شود و در عمل هرچه اندازه داده مورد استفاده کوچک‌تر باشد این مقدار محاسبه شده به واقعیت نزدیک‌تر است، به همین دلیل بلوک‌بندی انجام شده در الگوریتم پیشنهادی به عنوان یک نقطه قوت برای این روش بوده و کارایی الگوریتم را در تخمین مؤلفه رتبه پایین و تضعیف نوفه تصادفی افزایش می‌دهد. یکی از مراحل مهم دیگری که الگوریتم پیشنهادی به کار می‌گیرد، اعمال تبدیل موجک پیوسته بر روی بعد سوم یا بعد زمانی تانسور داده و گسترش ابعادی داده مورد نظر است که با این کار داده لرزه‌ای از حوزه $t-x-y$ به حوزه $f-t-x-y$ نگاشت می‌شود، در اثر اعمال این تبدیل داده به حوزه زمان - فرکانس منتقل می‌شود که با به‌کارگیری ویژگی‌ها و شرایط مناسب سیگنال و نوفه در این حوزه می‌توان با دقت و توانایی بالاتری به جدایش و تضعیف نوفه تصادفی از روی داده لرزه‌ای پرداخت. به عبارتی نوفه‌زدایی در حوزه زمان - فرکانس، یک نقطه قوت برای الگوریتم پیشنهادی به حساب می‌آید. در الگوریتم پیشنهادی با آستانه گذاری و اعمال وزن‌های بهینه بر روی مقادیر تکین و همچنین به‌کارگیری بردارهای راست و چپ حاصل از تجزیه مقادیر تکین مربوط به ماتریس سیگنال بدون نوفه و ماتریس سیگنال نوفه‌دار، مؤلفه رتبه پایین استخراج می‌شود، درحالی‌که الگوریتم T-OSSVD تنها با اعمال ضریب بهینه بر روی مقادیر تکین سروکار دارد و برای استخراج مؤلفه رتبه پایین بردارهای چپ و راست متناظر با مقادیر تکین را به کار نمی‌گیرد.

^۱ Standard Deviation

شروع

- ۱- ورودی: $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ تانسور داده لرزه‌ای نوفه‌دار.
- ۲- ورودی: B = بلوک تانسوری با اندازه $(m_1 \times m_2 \times m_3)$ ، پارامترهای موجک مناسب، برآورد رتبه مؤثر ماتریس سیگنال.
- ۳- تجزیه تانسور $A \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times n_3}$ به p بلوک تانسوری کوچک‌تر به صورت $\bar{A} \in \mathbb{R}^{(m_1 \times m_2 \times m_3)}$.
- ۴- در هر p بلوک:
- ۵- برای $i=1$ to m_1 و $j=1$ to m_2 انجام بده:
- ۶- $B_k \leftarrow CWT(\bar{A}_k, [], 3)$.
- ۷- مقادیر $B_k(:, :, i, j) = \sum_{t=1}^l \sigma_t p_t q_t^T$ و $\hat{\Sigma}_{\hat{r}} = \text{diag}(\hat{s}_{\hat{r}+1}, \dots, \hat{s}_l)$ را محاسبه کن.
- ۸- برای $\hat{r}=1$ to t انجام بده:
- ۹- مقدار $\hat{w}_{t,\hat{r}}^{opt}$ را طبق رابطه (۷-۳) محاسبه کن.
- ۱۰- بخش نوفه‌زدایی شده را به عنوان $\hat{M}_k(:, :, i) = \sum_{t=1}^{\hat{r}} \hat{w}_{t,\hat{r}}^{opt} p_t q_t^T$ بازیابی کن.
- ۱۱- معکوس تبدیل موجک پیوسته را به صورت $\hat{L}_k \leftarrow ICWT(\hat{M}_k, [], 3)$ اعمال کن.
- ۱۲- تا حاصل شدن مقدار خطا $\|L_k^{q+1} - L_k^q\|_F / \|L_k^q\|_F \leq \varepsilon$ مراحل بالا را تکرار کن.
- ۱۳- خروجی: $\hat{L} = \hat{L}_1 \otimes \hat{L}_2 \otimes \dots \otimes \hat{L}_p$

پایان

الگوریتم ۲: استخراج مؤلفه رتبه-پایین با استفاده از روش پیشنهادی

در الگوریتم ۲ عبارت $\otimes$ عملگر الحاق نامیده شده است. این عملگر با الحاق مؤلفه رتبه پایین حاصل از تمامی بلوک‌ها، مؤلفه رتبه پایین داده اصلی را به دست می‌آورد. به طور کلی الگوریتم معرفی شده در این پایان‌نامه طی سه مرحله اصلی انجام می‌شود، اول این که یک داده لرزه‌ای سه‌بعدی آغشته به نوفه تصادفی را به صورت یک تانسور در نظر می‌گیرد که اندازه آن $n_1 \times n_2 \times n_3$ و ترکیبی از مؤلفه رتبه پایین و تُنک می‌باشد و سپس این تانسور را به بلوک‌های هم‌اندازه و با سایز کوچک‌تر از داده اصلی تقسیم می‌کند. در مرحله دوم تبدیل موجک پیوسته در طول بعد سوم هر کدام از بلوک‌ها اعمال شده و مقادیر تکین و بردارهای چپ و راست متناظر با این مقادیر تکین در حوزه موجک محاسبه

می‌شوند و سپس مؤلفه رتبه پایین با استفاده از اعمال یک سری ضرایب بهینه، متناظر با مقادیر تکین محاسبه شده که در حوزه تبدیل موجک و در طول بعد سوم آستانه گذاری شده‌اند، به دست می‌آید و در مرحله آخر معکوس تبدیل موجک پیوسته در طول بعد انتقال داده شده محاسبه شده و مؤلفه رتبه پایین مربوط به هر بلوک جداگانه استخراج می‌شود، این فرایند تا حاصل شدن مقدار خطای موردنظر تکرار می‌شود که در این پایان‌نامه مقدار خطای میانگین مربعات (MSE) یا کاهش مربعات فروبنیوس با رابطه $L_{m,n}^{fro}(X, \hat{X}) = \|X - \hat{X}\|_F^2 = \sum_{i=1}^m \ell^2$ برای محاسبه مقدار خطای موردنظر استفاده شده است [۷۴]. در پایان نیز با الحاق مؤلفه رتبه پایین به دست آمده از تمامی بلوک‌ها، مؤلفه رتبه پایین داده اصلی به دست می‌آید.

فصل ۴: ارزیابی روش

۴-۱ مقدمه

در این پایان‌نامه با اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی داده لرزه‌ای مؤلفه رتبه پایین را استخراج نموده و مؤلفه تُنک با کم کردن ماتریس سیگنال رتبه پایین تخمین زده شده از ماتریس سیگنال نوفه‌دار به دست می‌آید. مؤلفه تُنک به عنوان ماتریس نوفه و مؤلفه رتبه پایین به عنوان ماتریس سیگنال نوفه‌زدایی شده در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی در نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای، این الگوریتم بر روی دو داده لرزه‌ای سه‌بعدی واقعی و دو داده سه‌بعدی مصنوعی تولید شده با نرم‌افزار MATLAB اعمال شده است و مقایسه نتیجه‌های حاصل از روش پیشنهادی با سه روش، T-OSSVD، BM4D و IBTSVT بر اساس معیارهای مختلف نشان داده شده است.

۴-۲ معیارهای ارزیابی روش پیشنهادی

با در نظر گرفتن معیارهای مختلف می‌توان عملکرد روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، BM4D و IBTSVT در تضعیف نوفه‌های تصادفی از داده‌های لرزه‌ای را با هم مقایسه کرد. طیف دامنه میانگین یکی از این معیارهاست که روش‌های مختلف را از لحاظ کیفی با یکدیگر مقایسه می‌کند. در این مقایسه ابتدا طیف میانگین داده بدون نوفه مشخص می‌شود، سپس بعد از بازیابی ماتریس سیگنال نوفه‌زدایی شده توسط هر روش، مقدار طیف دامنه میانگین برای همه سیگنال‌های بازیابی شده به دست می‌آید. طیف دامنه میانگین هر کدام از الگوریتم‌های مورد مقایسه که به طیف دامنه میانگین ماتریس بدون نوفه نزدیک‌تر باشد، آن الگوریتم عملکرد بهتری در نوفه‌زدایی دارد. این معیار مقایسه هم برای داده مصنوعی و هم برای داده طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یک معیار مقایسه‌ای دیگر نسبت سیگنال به نوفه (SNR) در داده مصنوعی است، اما در داده

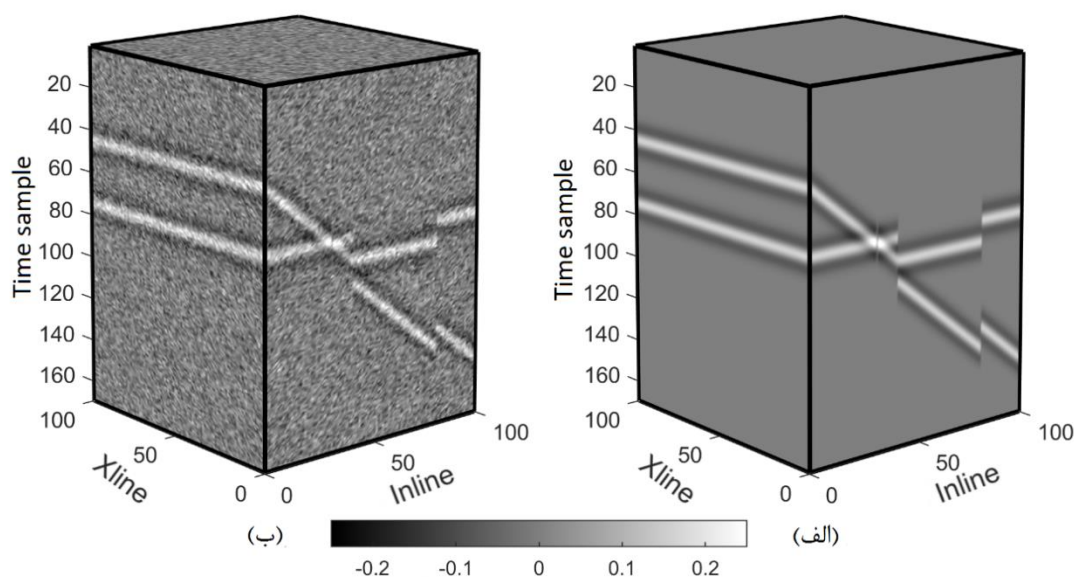
واقعی نمی‌توان از این معیار بهره برد، چرا که در داده واقعی سیگنال بدون نوفه در دسترس نیست. این معیار دو روش را از لحاظ کمی مقایسه می‌کند. در یک روش هر چقدر این نسبت مقدار بالاتری داشته باشد، بیانگر توانمندی بالای آن روش در تضعیف نوفه می‌باشد، نسبت سیگنال به نوفه به صورت رابطه (۱-۴) است و در این رابطه عبارت p_{signal} و p_{noise} به ترتیب بیانگر انرژی سیگنال عاری از نوفه و انرژی نوفه می‌باشد.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{signal}}{p_{noise}} \right) \quad (۱-۴)$$

یک معیار دیگر برای مقایسه روش‌های تضعیف نوفه در داده مصنوعی و واقعی، تفاضل سیگنال نوفه‌دار و سیگنال نوفه‌زدایی شده است. هر چقدر این تفاضل مقدار کمتری از سیگنال اصلی و مقدار بیشتری از نوفه را در خود جای داده باشد، روش مورد استفاده توانایی بالاتری در تضعیف نوفه دارد و آسیب کمتری به سیگنال‌های اصلی وارد کرده است [۸۵،۶۱].

۳-۴ داده مصنوعی سه‌بعدی فاقد رویداد منحنی

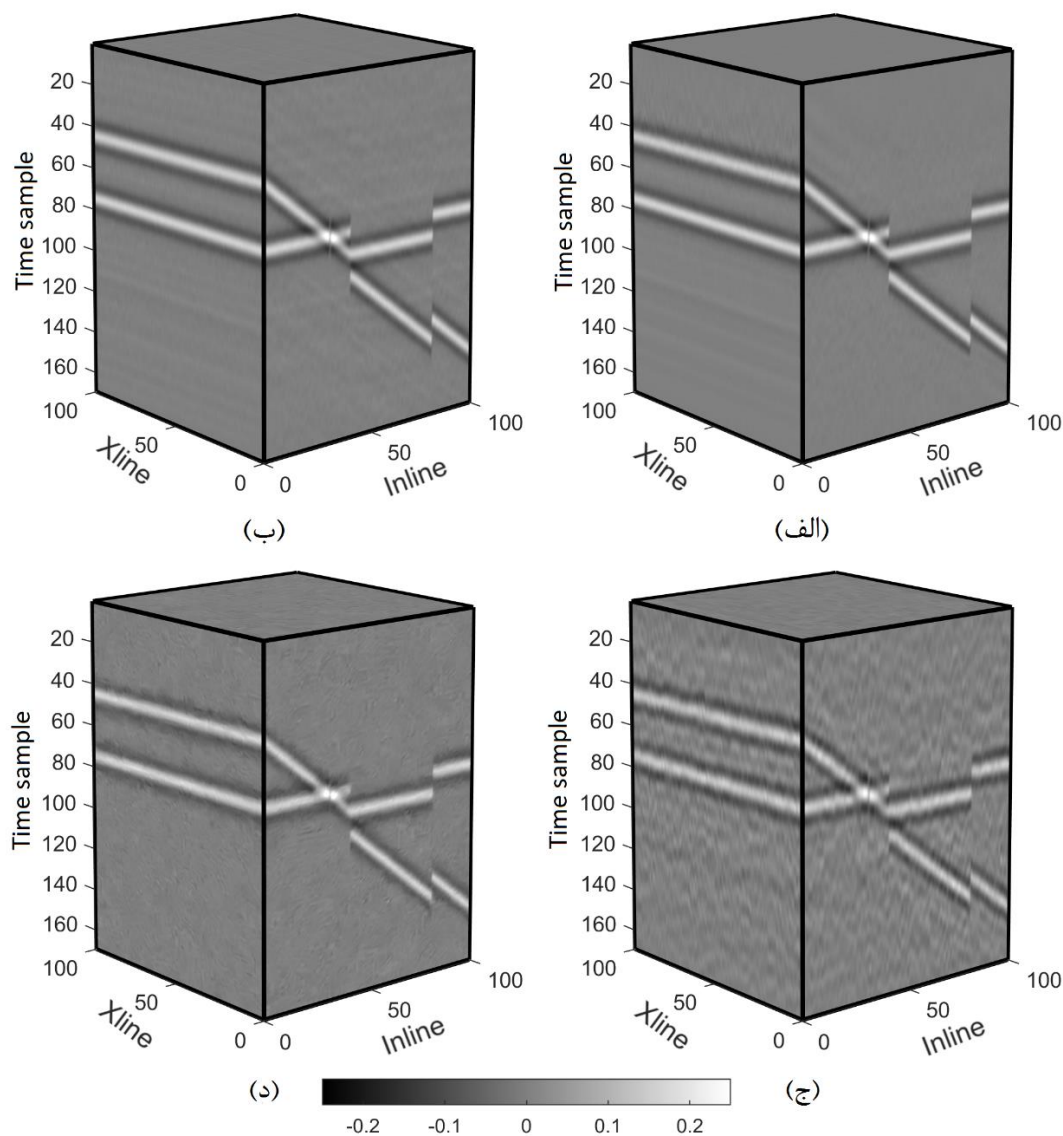
در شکل ۱-۴ (الف) یک داده مصنوعی سه‌بعدی نشان داده شده است که این داده شامل ۱۰۰ ردلرزه در جهت خط گیرنده، ۱۰۰ ردلرزه در جهت خط چشمه و ۱۷۰ نمونه زمانی می‌باشد. این داده شامل دو رویداد خطی افقی و شیب‌دار است که در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از موجک ریکر، با فرکانس غالب ۳۵ هرتز با گام نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه هم‌امیخت شده است. در این داده مصنوعی دو ناپیوستگی در رویدادهای خطی و شیب‌دار ایجاد شده است. شکل ۱-۴ (ب) همین داده را نشان می‌دهد که با نسبت سیگنال به نوفه ۴- دسی‌بل به نوفه تصادفی گوسی سفید آغشته شده است.



شکل ۴-۱: (الف) داده سه‌بعدی مصنوعی با دو رویداد خطی و شیب‌دار. (ب) داده سه‌بعدی مصنوعی که به نوفه تصادفی آغشته شده است.

در این پایان‌نامه چهار روش T-OSSVD، BM4D، IBTSVT و روش پیشنهادی بر روی داده شکل ۴-۱ (ب) اعمال شده‌اند و نتیجه‌های حاصل در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. در روش پیشنهادی چون داده مدنظر دارای دو رویداد است، مقدار پارامتر رتبه برای بازیابی مؤلفه رتبه-پایین برابر ۲ و موجک استفاده شده در این روش موجک مورلت در نظر گرفته شده است. همچنین بلوک‌بندی انجام شده در روش پیشنهادی به صورت $25 \times 25 \times 340$ فرض شده است، که در این حالت همپوشانی خوبی در بلوک‌بندی ایجاد می‌شود و لبه‌های سیگنال نیز بدون اعوجاج بازیابی می‌شوند ولی در مقابل، تحلیل سیگنال به زمان بیشتری نیاز دارد، پس در روش پیشنهادی اندازه بعد سوم بلوک‌ها دو برابر بعد سوم داده اصلی در نظر گرفته شده است. در روش T-OSSVD بهترین حالت برای بتا که برابر یک می‌باشد در نظر گرفته شده است، این پارامتر به صورت $0 < \beta \leq 1$ قابل تغییر است و با تجربه و آزمایش بر روی داده‌های مختلف مشخص شده است که اگر این پارامتر برابر یک در نظر گرفته شود، بهترین حالت نوفه‌زدایی از این روش حاصل می‌شود و با کاهش مقدار بتا به طرف صفر از توانایی روش کاسته می‌شود. مقدار SD یا انحراف معیار نوفه در الگوریتم پیشنهادی و T-OSSVD نیز بر مبنای داده مورد استفاده تخمین زده می‌شود. در روش IBTSVT ابتدا داده به

بلوک‌های کوچک‌تر تقسیم شده و سپس الگوریتم بر روی هر کدام از این بلوک‌ها اعمال می‌شود که اندازه هر بلوک در این روش به صورت $5 \times 5 \times 680$ در نظر گرفته شده است که در این حالت بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد و همچنین پارامتر $\tau = 800 / \sqrt{n_1 n_2}$ در نظر گرفته شده است که این مقدار با تجربه به دست آمده است و مقادیر n_1 و n_2 ابعاد مکانی بلوک در نظر گرفته شده می‌باشند. در روش BM4D تمامی پارامترها مانند روش T-OSSVD انتخاب شده است، همچنین در پارامترهای تعریف شده برای الگوریتم BM4D نوع نوفه موجود در داده، گوسی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۲: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۴-۱ (ب) توسط روش‌های، (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) BM4D، (د) IBTSVT.

با مشاهده نتایج نشان داده شده در شکل ۴-۲ مشخص است که توانایی روش پیشنهادی در نوفه‌زدایی داده مصنوعی که فاقد رویداد منحنی می‌باشد از سه روش دیگر بالاتر است، چرا که مقدار نوفه تضعیف شده در نتیجه اعمال این روش، از سه روش دیگر بیشتر بوده و این نشان از عملکرد خوب این روش در نوفه‌زدایی داده شکل ۴-۱ (ب) دارد.

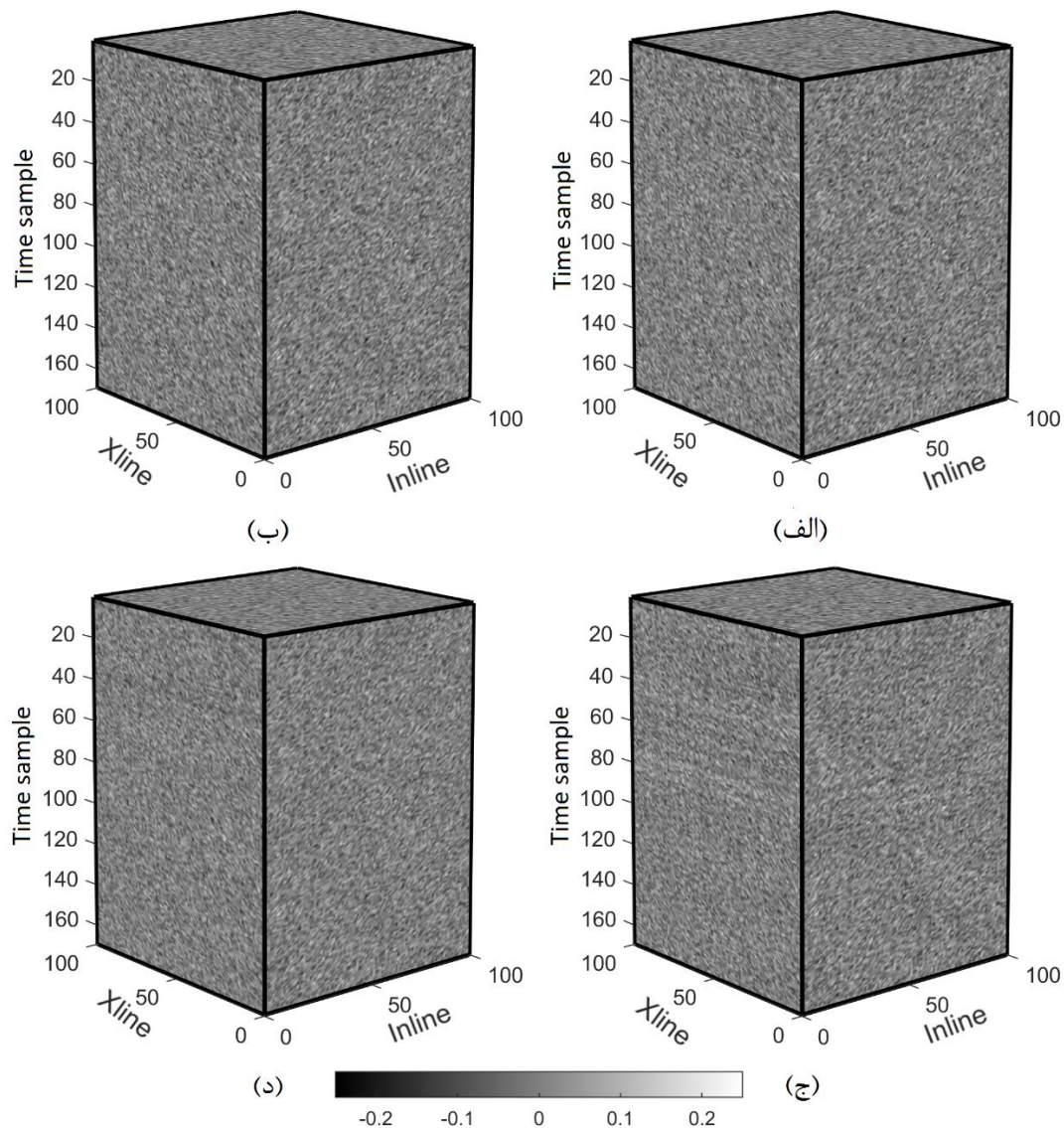
از دلایل برتری روش پیشنهادی نسبت به روش T-OSSVD در نوفه‌زدایی داده شکل ۴-۱ (ب) می‌توان به استفاده و به‌کارگیری تبدیل موجک پیوسته به جای تبدیل فوریه سریع و همچنین بلوک‌بندی انجام شده در روش پیشنهادی اشاره کرد، چرا که در روش پیشنهادی داده لرزه‌ای سه‌بعدی به صورت تانسور در نظر گرفته شده است و بلوک‌بندی در تخمین دقیق‌تر مؤلفه رتبه-پایین مؤثر است، همچنین تبدیل موجک پیوسته در بازیابی رویدادهای خطی و شیب‌دار عملکرد بهتری نسبت به تبدیل فوریه دارد. در جدول ۴-۱: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه روش پیشنهادی و سه روش نشان داده شده است، مقدار نسبت سیگنال به نوفه برای روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر مقدار بالاتری دارد و این یک معیار برای نشان دادن عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر است.

جدول ۴-۱: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه روش پیشنهادی و سه روش مقایسه‌ای دیگر برای داده شکل ۴-۱ (ب).

روش	روش پیشنهادی	T-OSSVD	BM4D	IBTSVT
نسبت سیگنال به نوفه	۱۹/۳	۱۸/۱	۱۲/۷	۷/۶

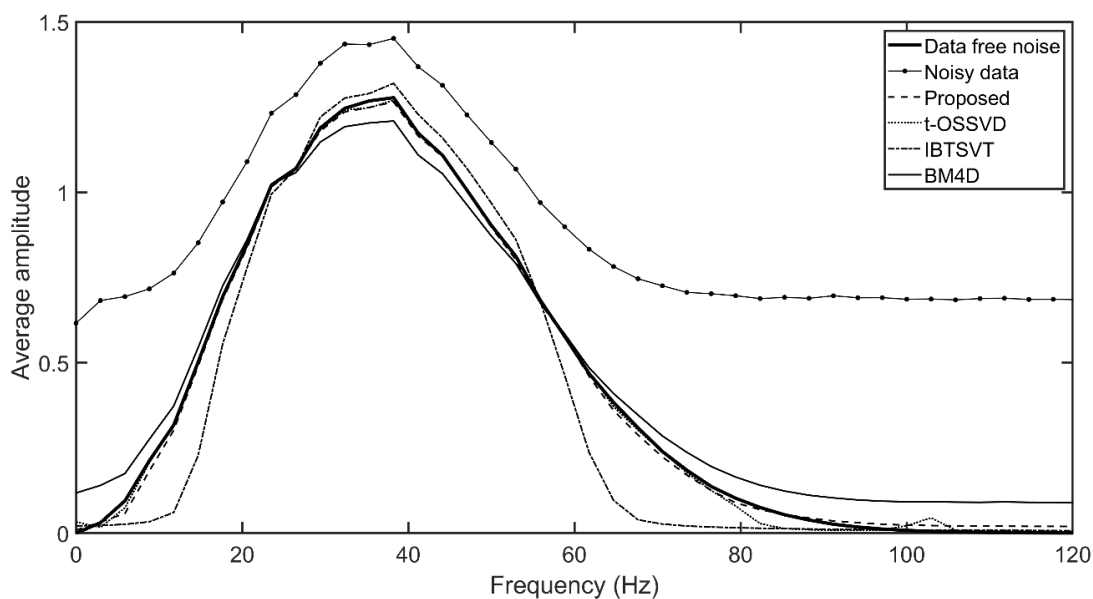
در شکل ۴-۳ مقدار تفاضل بین داده نوفه‌ای و بازیابی شده برای روش پیشنهادی، T-OSSVD، BM4D و IBTSVT نشان داده شده است. این تفاضل به عنوان یک معیار، برتری یک روش را نسبت به روش‌های دیگر در تضعیف نوفه نشان می‌دهد. در شکل ۴-۳ علاوه بر روش پیشنهادی در دو روش BM4D و T-OSSVD مقدار آسیب به سیگنال اصلی ناچیز می‌باشد، درحالی‌که در روش پیشنهادی

مقدار نوفه تصادفی بیشتری نسبت به سه روش دیگر تضعیف شده است. در دو روش BM4D و T-OSSVD اگر نسبت سیگنال به نوفه بالاتر باشد عملکرد این دو روش تا حدودی بهبود می‌یابد اما در این داده مصنوعی نسبت سیگنال به نوفه برابر ۴- دسی‌بل در نظر گرفته شده است.



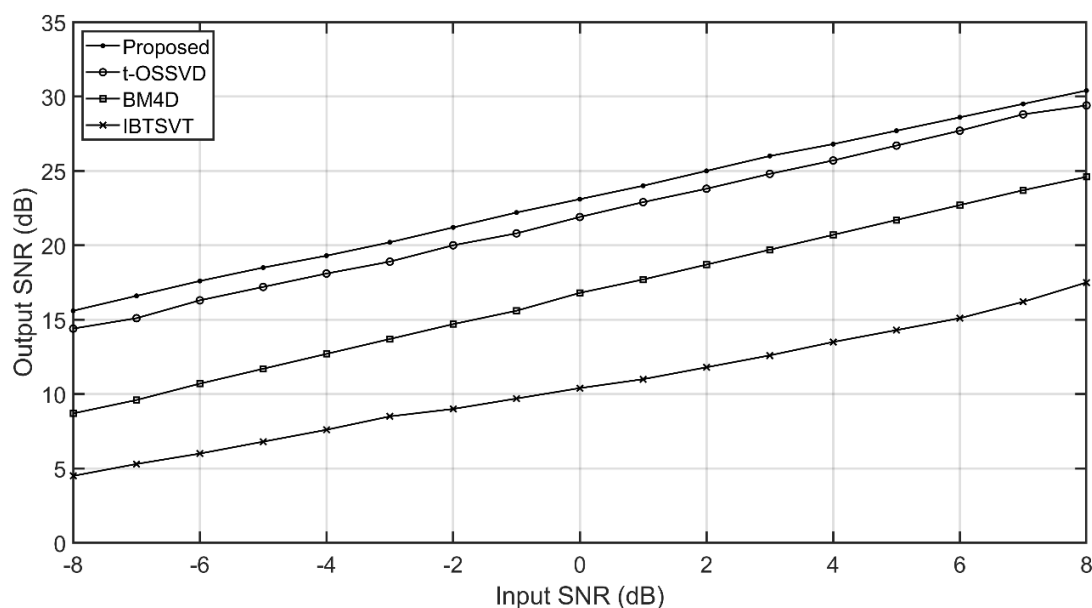
شکل ۴-۳: تفاضل بین داده نوفه‌ای در شکل ۴-۱ (ب) و داده بازیابی شده توسط روش‌های (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D.

به منظور نشان دادن کارایی بهتر روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر، طیف دامنه میانگین سیگنال بدون نوفه، نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده برای داده مصنوعی توسط این روش‌ها در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. با مقایسه طیف دامنه در شکل ۴-۴ برتری روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر مشخص بوده و مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی عملکرد بهتری در حفظ دامنه سیگنال‌های اصلی داشته است.



شکل ۴-۴: طیف دامنه میانگین داده بدون نوفه، نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، IBTSVT، BM4D.

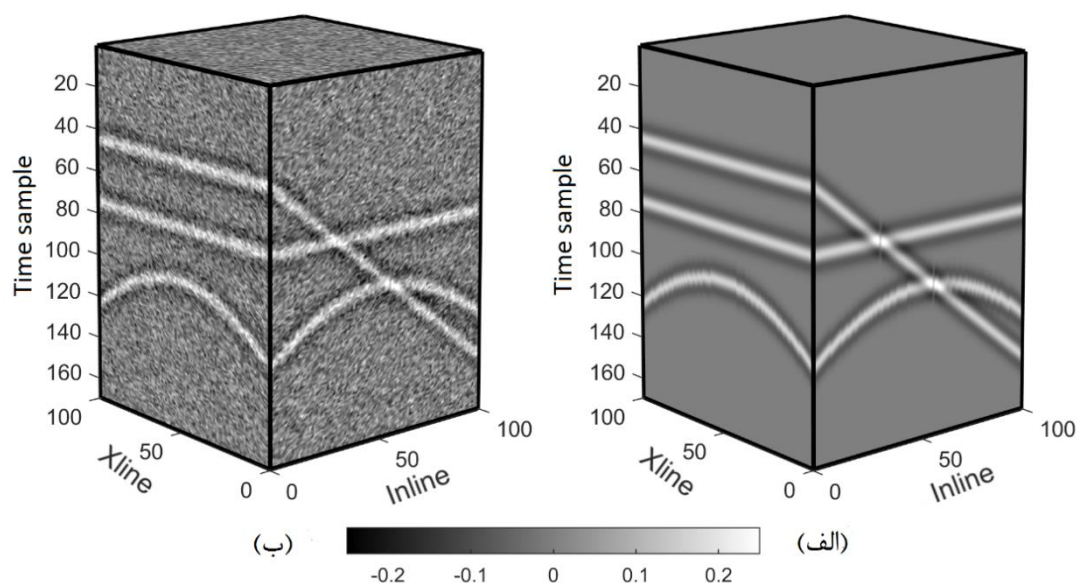
تأثیر روش پیشنهادی و سه روش مذکور در تضعیف نوفه تصادفی گوسی موجود در داده شکل ۴-۱ (ب) برحسب نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی، در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از این نمودار پیداست روش پیشنهادی در تمامی نسبت‌های سیگنال به نوفه عملکرد بهتر و قوی‌تری از خود نشان داده است و همچنین روش پیشنهادی توانسته است، عملکرد روش T-OSSVD را به مقدار قابل توجهی بهبود دهد.



شکل ۴-۵: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه خروجی برای روش پیشنهادی و سه روش مذکور با نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی در مثال شکل ۴-۱.

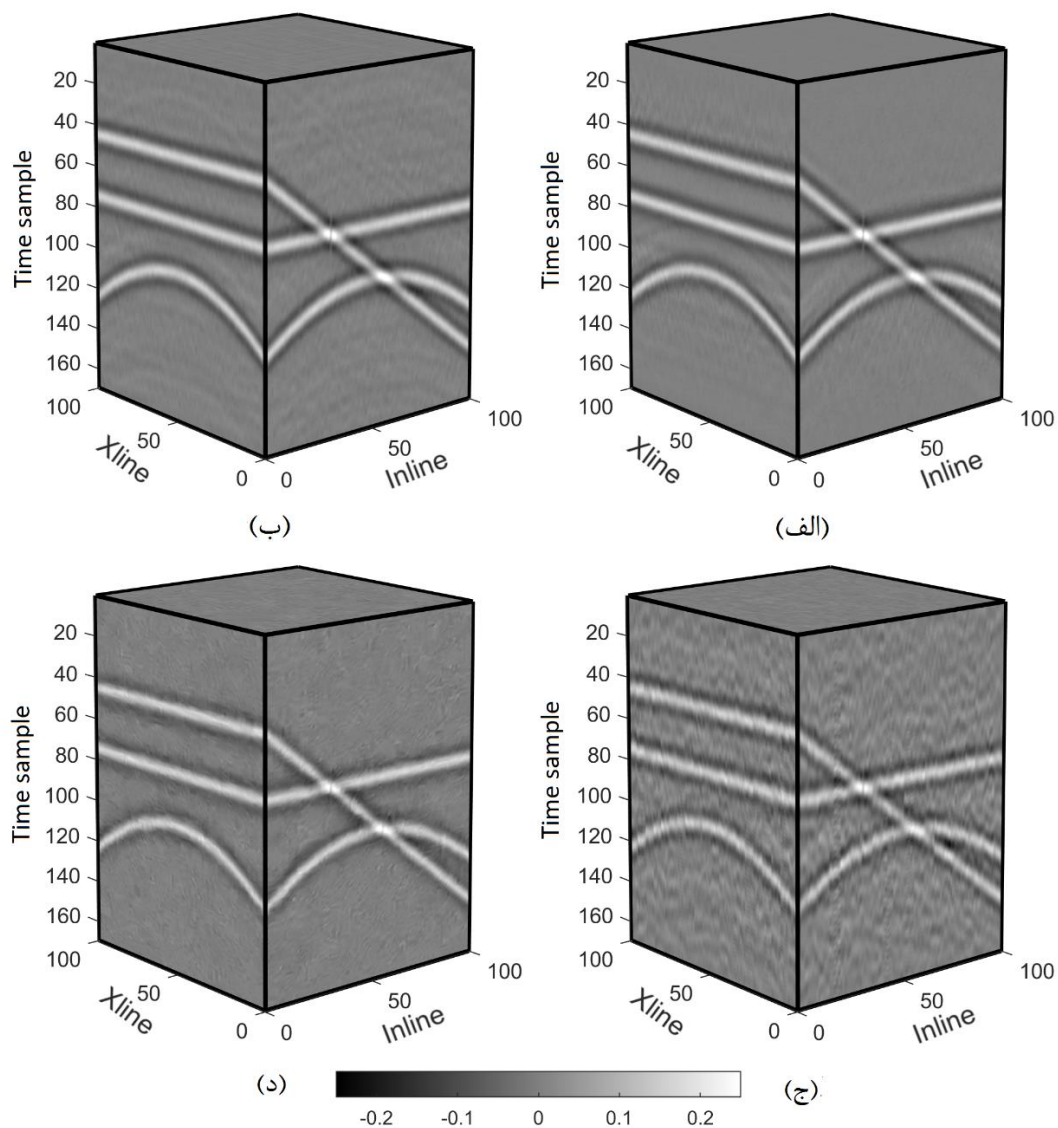
۴-۴ داده مصنوعی سه‌بعدی حاوی رویداد منحنی

در شکل ۴-۶ (الف) یک داده مصنوعی سه‌بعدی نشان داده شده است. ابعاد این داده مانند داده معرفی شده در شکل ۴-۱ می‌باشد با این تفاوت که این داده فاقد شکستگی بوده و شامل سه رویداد خطی، شیب‌دار و منحنی است که در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از موجک ریکر، با فرکانس غالب ۳۵ هرتز و با گام نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه هم‌میکت شده است. دلیل انتخاب این داده مصنوعی، بررسی عملکرد روش پیشنهادی و سه روش دیگر در نوفه‌زدایی داده پیچیده‌تر و بازیابی رویدادهای منحنی می‌باشد. شکل ۴-۶ (ب) همان داده مصنوعی را نشان می‌دهد که با نسبت سیگنال به نوفه ۴-دسی‌بل، به نوفه تصادفی گوسی سفید آغشته شده است.



شکل ۴-۶: الف) داده سه بعدی مصنوعی با رویداد خطی، شیب دار و منحنی. ب) داده سه بعدی مصنوعی حاوی نوفه.

چهار روش نوفه زدایی که در بالا معرفی شد، بر روی داده شکل ۴-۶ (ب) اعمال شدند. در روش پیشنهادی مقدار پارامتر رتبه به دلیل وجود سه رویداد خطی، شیب دار و منحنی در داده برابر ۳ تخمین زده شده است و در این روش بلوک بندی به صورت مثال شکل ۴-۱ در نظر گرفته شده است. همچنین موجک مورد استفاده در روش پیشنهادی موجک مورلت می باشد. برای سه روش T-OSSVD، BM4D و IBTSVT نیز تمامی پارامترهای مؤثر بدون تغییر و همانند مثال شکل ۴-۱ در نظر گرفته شده اند. نتایج نوفه زدایی این داده توسط چهار روش مذکور در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که روش پیشنهادی عملکرد بهتری در بازیابی ماتریس سیگنال رتبه-پایین و تضعیف نوفه تصادفی داشته است و نسبت سیگنال به نوفه خروجی در روش پیشنهادی از سایر روش های مقایسه ای بالاتر است، خصوصاً برای داده های که حاوی مقدار بالایی از نوفه تصادفی هستند. روش پیشنهادی برای نوفه زدایی داده های حاوی رویداد منحنی به خوبی عمل کرده و نتیجه قابل قبول تری نسبت به سایر روش ها دارد.



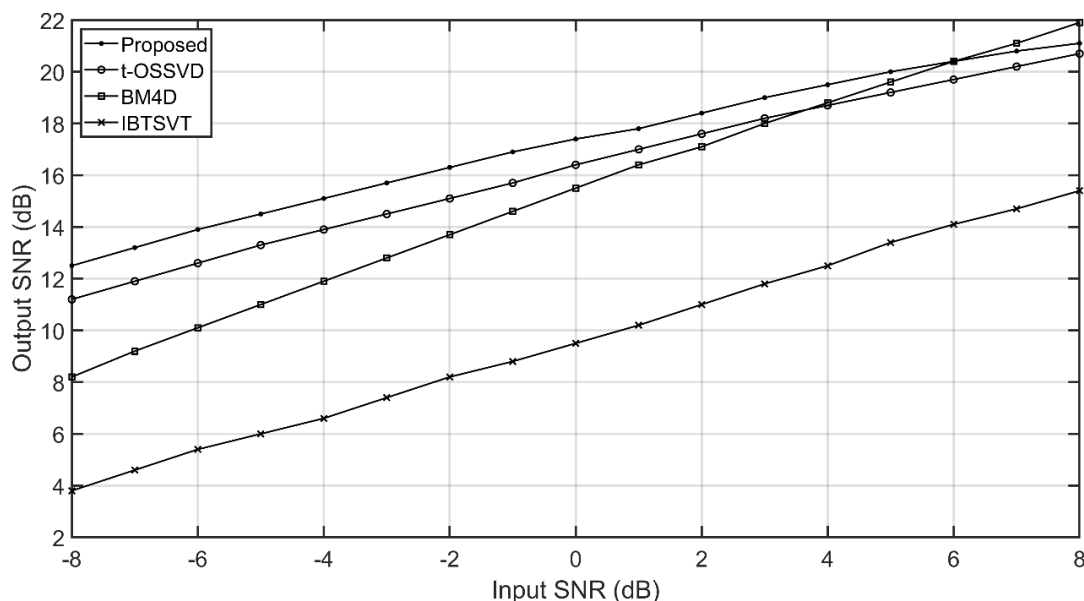
شکل ۷-۴: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده نوفه‌دار شکل ۶-۴ (ب) توسط چهار روش، (الف) روش پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D.

مقدار نسبت سیگنال به نوفه خروجی برای روش پیشنهادی و سه روش دیگر در جدول ۲-۴ نشان داده شده است. این نسبت یک معیار برای نشان دادن عملکرد بهتر روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر در داده مصنوعی شکل ۶-۴ (ب) می‌باشد.

جدول ۴-۲: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه روش پیشنهادی و سه روش مقایسه‌ای دیگر برای داده شکل ۴-۶ (ب).

IBTSVT	BM4D	T-OSSVD	روش پیشنهادی	روش
۶/۶	۱۱/۹	۱۳/۹	۱۵/۱	نسبت سیگنال به نوفه

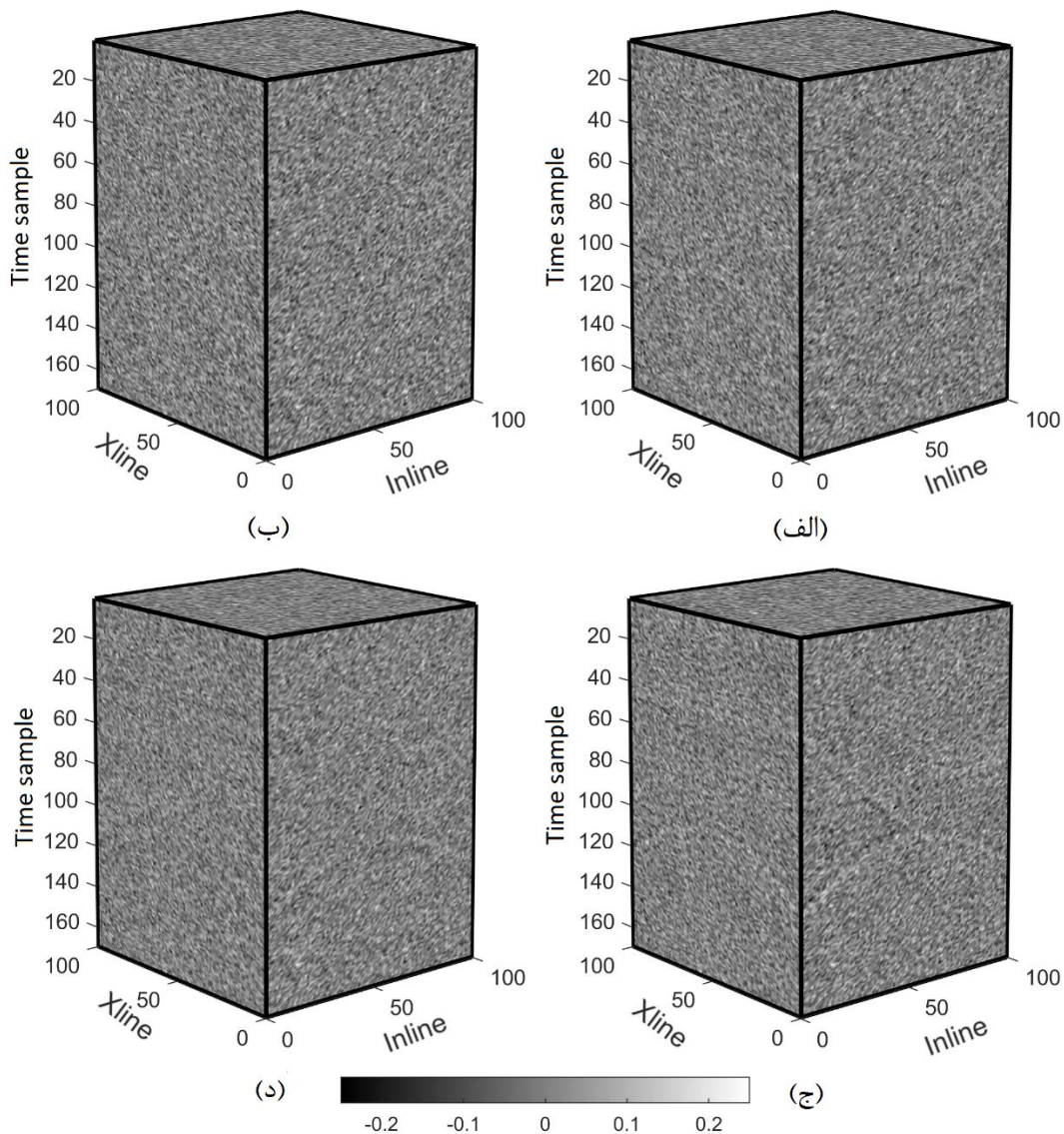
در نمودار شکل ۴-۸ تأثیر روش پیشنهادی و سه روش مذکور در تضعیف نوفه تصادفی گوسی سفید موجود در داده شکل ۴-۶ (ب) بر حسب نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار این شکل پیداست، روش پیشنهادی در نسبت سیگنال به نوفه‌های ورودی پایین عملکرد بسیار بهتری نسبت به سه روش دیگر دارد. روش BM4D در نسبت سیگنال به نوفه‌های بالا عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد ولی در داده مورد استفاده چون نسبت سیگنال به نوفه مقدار پایینی دارد (۴-دسی‌بل) عملکرد این روش ضعیف است. به دلیل وجود رویداد منحنی در داده روش IBTSVT عملکرد چندان مناسبی نداشته، مخصوصاً در نسبت سیگنال به نوفه‌های پایین کارایی این روش برای نوفه‌زدایی به شدت کاهش می‌یابد. در نوفه‌زدایی داده شکل ۴-۶ (ب) روش T-OSSVD نسبت به دو روش BM4D و IBTSVT بهتر عمل کرده است.



شکل ۴-۸: مقایسه نسبت سیگنال به نوفه خروجی برای روش پیشنهادی و سه روش مذکور با نسبت‌های متفاوت سیگنال به نوفه ورودی در مثال شکل ۴-۶ (ب).

در شکل ۴-۹ تفاضل بین داده نوفه‌ای شکل ۴-۶ (ب) و داده بازیابی شده توسط روش پیشنهادی و سه روش، t-OSSVD، BM4D و IBTSVT نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود روش پیشنهادی علاوه بر تضعیف بیشتر نوفه تصادفی نسبت به سایر روش‌ها، دامنه سیگنال‌های اصلی را به خوبی حفظ نموده و در این روش انرژی بازتاب‌ها اصلی نسبت به سه روش دیگر کمتر تضعیف شده است. با توجه به خروجی‌های نشان داده شده در این شکل، دو روش t-OSSVD و روش پیشنهادی کمترین تضعیف را در رویدادهای اصلی داشته‌اند، اما در دو روش BM4D و IBTSVT همان‌طور که مشاهده می‌شود، علاوه بر آسیب زدن به رویدادهای منحنی، در رویدادهای خطی و شیب‌دار نیز آسیب قابل توجهی به سیگنال اصلی وارد ساخته‌اند. در نسبت‌های سیگنال به نوفه ورودی پایین روش پیشنهادی کمترین تضعیف در رویدادهای اصلی را نسبت به سه روش دیگر دارد. دلیل این عملکرد مناسب، قدرت این روش در تخمین دقیق مؤلفه رتبه-پایین و همچنین قدرت تفکیک بالای آن می‌باشد. در پردازش سیگنال و عملیات نوفه‌زدایی علاوه بر تضعیف هرچه بیشتر نوفه، بازیابی با کمترین آسیب به سیگنال‌های اصلی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

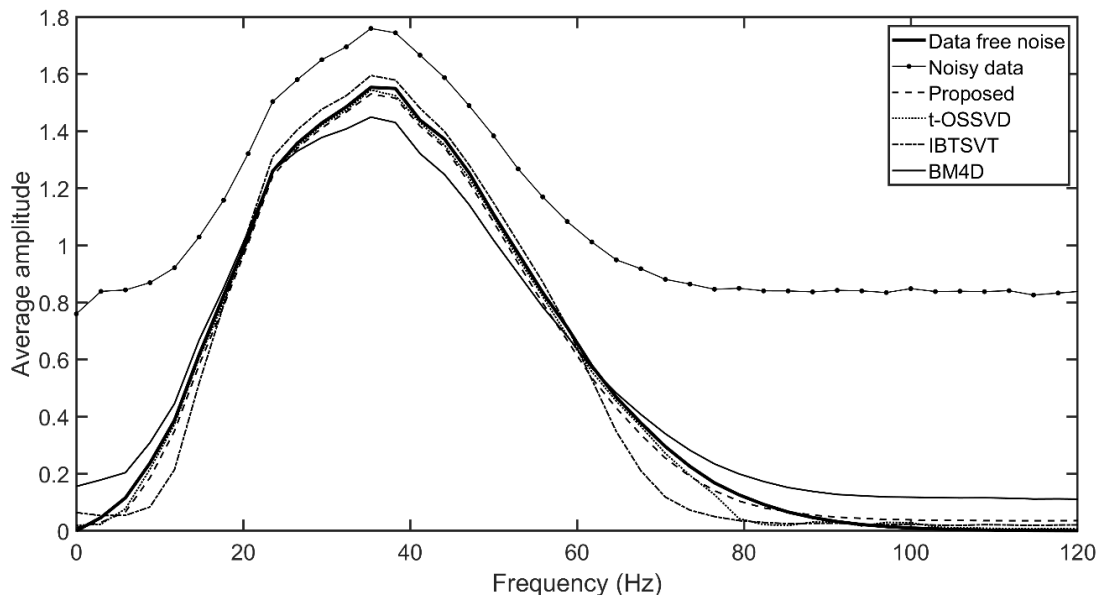
در روش IBTSVT علاوه بر تضعیف نوفه کمتر نسبت به سایر روش‌ها، مقدار آسیب به سیگنال‌های اصلی به ویژه رویداد منحنی در مقایسه با سه روش دیگر فراوان می‌باشد.



شکل ۴-۹: تفاضل بین داده نوفه‌ای در شکل ۴-۶ (ب) و داده بازیابی شده توسط روش‌های الف) پیشنهادی، ب) T-OSSVD، ج) IBTSVT، د) BM4D.

طیف دامنه میانگین سیگنال بدون نوفه، نوفه‌دار و نوفه زدا شده برای داده مصنوعی شکل ۴-۶ توسط روش پیشنهادی و سه روش دیگر در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که از منحنی‌های این شکل پیداست، طیف دامنه سیگنال بازیابی شده با استفاده از روش پیشنهادی

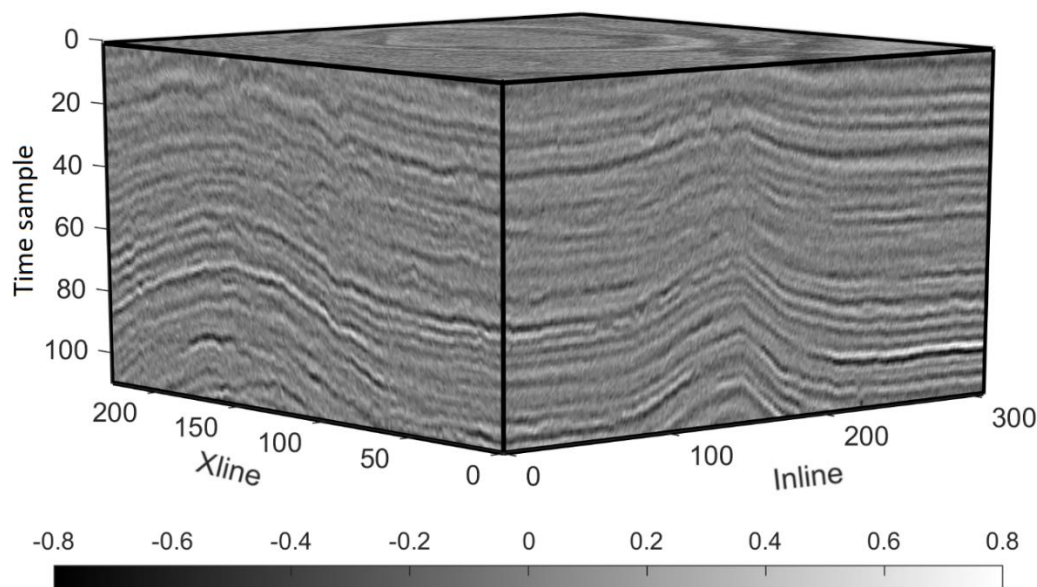
بیشترین شباهت و همپوشانی را با طیف دامنه سیگنال بدون نوفه دارد و این همپوشانی بالا گویای عملکرد مناسب روش پیشنهادی نسبت به سه روش مقایسه‌ای دیگر در تضعیف نوفه گوسی سفید از داده نوفه‌ای می‌باشد.



شکل ۴-۱۰: طیف دامنه میانگین داده بدون نوفه، نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۶ و خروجی حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، t-OSSVD، IBTSVT و BM4D.

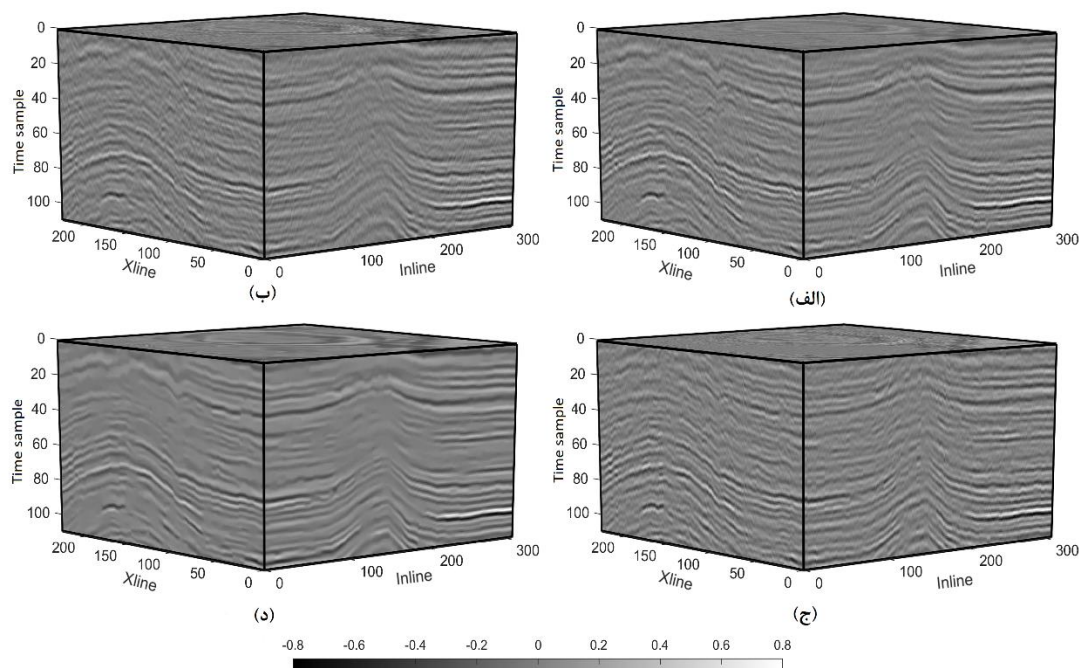
۴-۵ داده لرزه‌ای واقعی

در ادامه برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی و سه روش معرفی شده دیگر بر روی داده واقعی، یک داده واقعی با ۲۳۱ ردلرزه در جهت خط گیرنده و ۳۱۱ ردلرزه در جهت خط چشمه و ۱۱۰ نمونه زمانی با بازه نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه، از یک میدان نفتی در جنوب غرب ایران انتخاب گردید، این داده در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، این داده طبیعی شامل یک گنبد نمکی می‌باشد، این گنبد نمکی باعث ایجاد انحنا و شکستگی‌های فراوانی در بافت و لایه‌های زمین‌شناسی منطقه شده است و رویدادهای خطی و منحنی زیادی را در داده ایجاد کرده و باعث ایجاد یک داده لرزه‌ای پیچیده شده است که نوفه‌زدایی آن دشوار است.



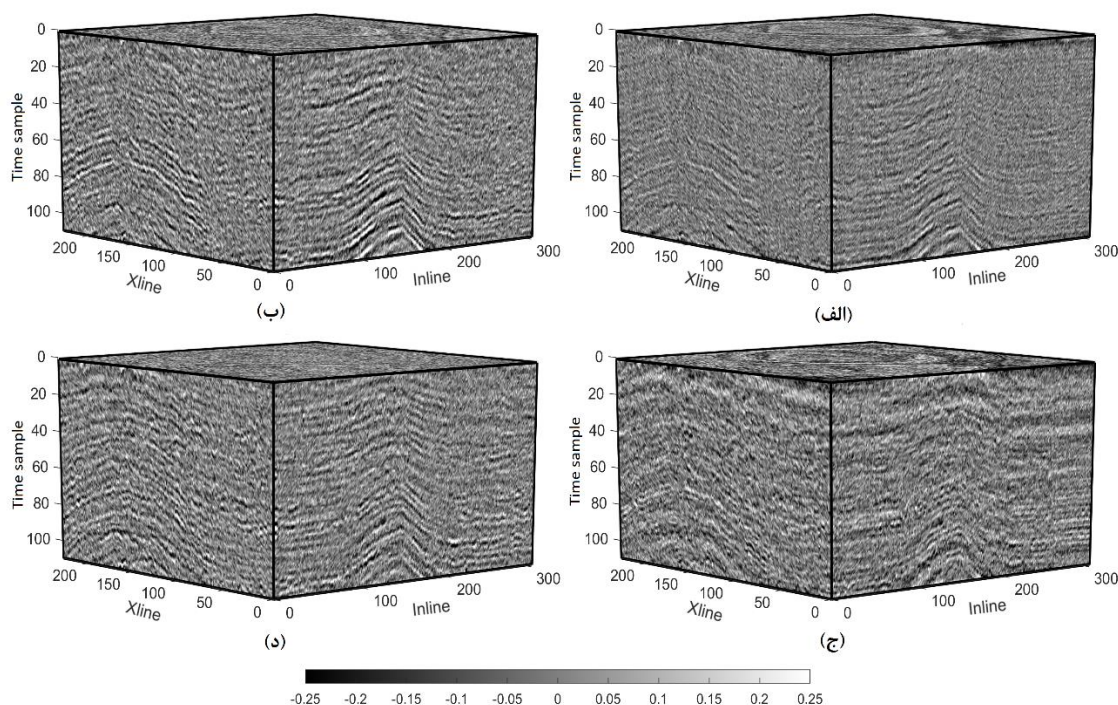
شکل ۴-۱۱: داده برداشت شده از یک میدان نفتی در جنوب غرب ایران.

شکل ۴-۱۲ نتایج اعمال روش پیشنهادی و سه روش، T-OSSVD، BM4D و IBTSVT بر روی داده واقعی شکل ۴-۱۱ را نشان می‌دهد. برای نوفه‌زدایی این داده واقعی که دارای رویدادهای خطی، منحنی و شیب‌دار فراوانی می‌باشد، به دلیل وجود رویدادها و بازتاب‌های فراوان موجود در داده، مقدار رتبه مؤثر برای روش پیشنهادی برابر ۷۰ در نظر گرفته شده است که یک تقریب مناسب برای این داده می‌باشد و در این حالت با در نظر گرفتن موجک مورلت بهترین نوفه‌زدایی از روش پیشنهادی مشاهده می‌شود، همچنین بلوک‌بندی انجام شده برای روش پیشنهادی برابر $100 \times 100 \times 220$ می‌باشد. در روش T-OSSVD مقدار بتا برابر یک در نظر گرفته شده است. در روش IBTSVT نیز مقدار تاو با تجربه و آزمایش برابر $\tau = 500 / \sqrt{n_1 \times n_2}$ و اندازه بلوک در نظر گرفته شده برابر $5 \times 5 \times 660$ است. در روش BM4D تمامی پارامترها بدون تغییر و مانند قبل تعیین شده‌اند.



شکل ۴-۱۲: نتایج اعمال الگوریتم‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۴-۱۱ توسط، الف) روش پیشنهادی، ب) T-OSSVD، ج) IBTSVT، د) BM4D.

همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها دارای بازیابی بهتر سیگنال و همچنین تضعیف بهتر نوفه می‌باشد. در نگاه اول شاید چنان حس شود که روش BM4D عملکرد بهتری داشته است، اما با دقت در نتایج به دست آمده مشخص می‌شود که روش BM4D ساختار رویدادهای اصلی را تغییر داده و دامنه‌ها را به‌طور غیرواقعی نشان داده است، روش پیشنهادی کمترین تغییری در ساختار و دامنه رویدادهای اصلی ایجاد کرده است و علاوه بر تضعیف قابل توجه در نوفه تصادفی، رویدادهای اصلی را نیز به خوبی بازیابی نموده است. برای ارزیابی بیشتر عملکرد این روش‌ها، تفاضل بین داده طبیعی نوفه‌دار و داده بازیابی شده توسط هر روش در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.

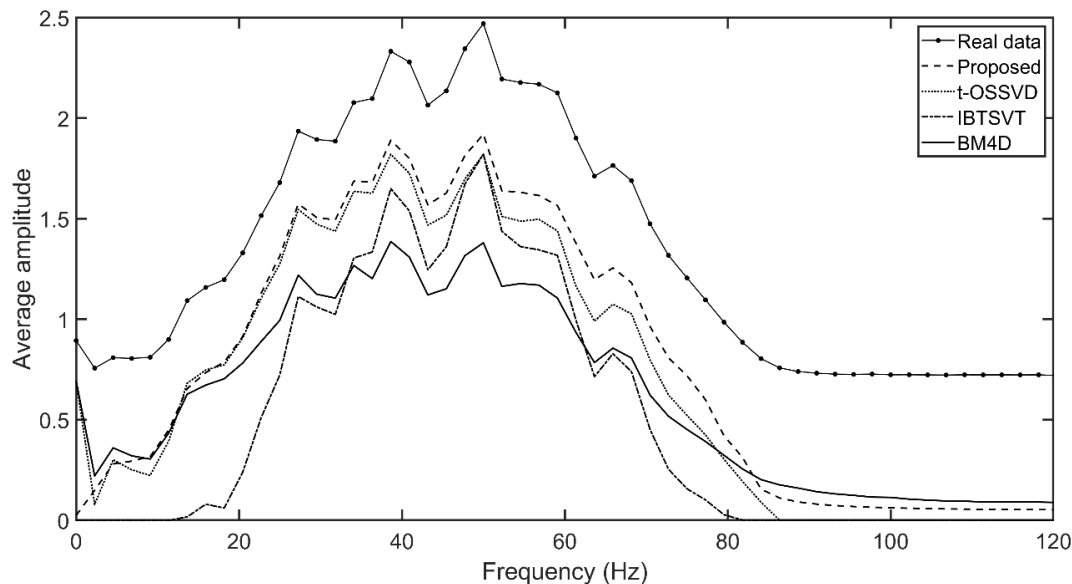


شکل ۴-۱۳: تفاضل بین داده واقعی در شکل ۴-۱۱ و داده بازیابی شده توسط روش‌های (الف) پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D.

همان‌طور که از شکل ۴-۱۳ قابل مشاهده است، روش پیشنهادی کمترین آسیب را به سیگنال‌های اصلی وارد کرده و در بازیابی رویدادهای خطی و شیب‌دار نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری داشته است. تضعیف خیلی جزئی که در رویدادهای منحنی وجود دارد، تقریباً در همه روش‌ها قابل مشاهده بوده و بیشتر به دلیل ساختار پیچیده داده مورد مطالعه می‌باشد. در روش T-OSSVD اگرچه مقدار قابل توجهی از نوفه موجود در داده تضعیف شده است، اما به نسبت زیادی سیگنال‌های اصلی مربوط به رویدادهای منحنی نیز تضعیف شده‌اند. روش T-OSSVD رویدادهای خطی را مانند روش پیشنهادی به خوبی بازیابی می‌کند ولی برای روش‌های BM4D و IBTSVT علاوه بر تضعیف رویدادهای منحنی، در رویدادهای خطی نیز تضعیف فراوانی مشاهده می‌شود که این تضعیف در روش پیشنهادی دارای کمترین مقدار می‌باشد.

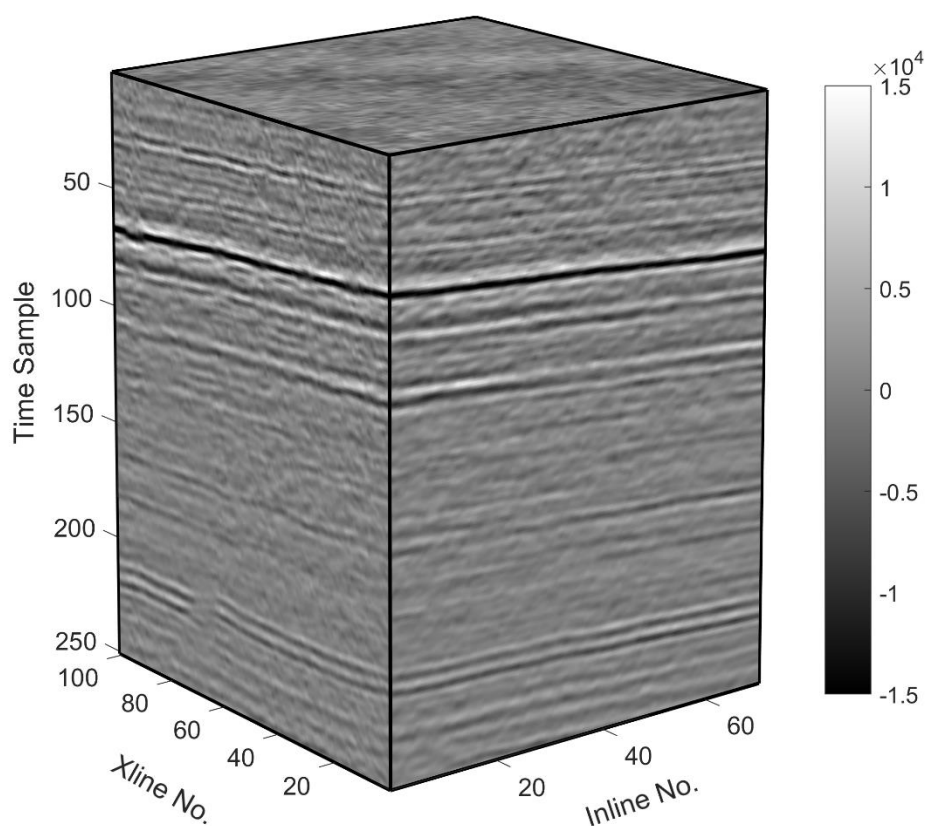
در شکل ۴-۱۴ طیف دامنه میانگین سیگنال نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده برای داده واقعی شکل ۴-۱۱ توسط روش پیشنهادی و سه روش مقایسه‌ای دیگر نشان داده شده است. منحنی‌های نشان داده شده

در این شکل عملکرد بهتر روش پیشنهادی را تصدیق می‌کنند، به این صورت که طیف دامنه میانگین بازیابی شده با روش پیشنهادی بیشترین شباهت را به طیف دامنه داده واقعی دارد و این به معنای کمترین آسیب به سیگنال‌های اصلی و بیشترین تضعیف در نوفه موجود در داده واقعی می‌باشد.



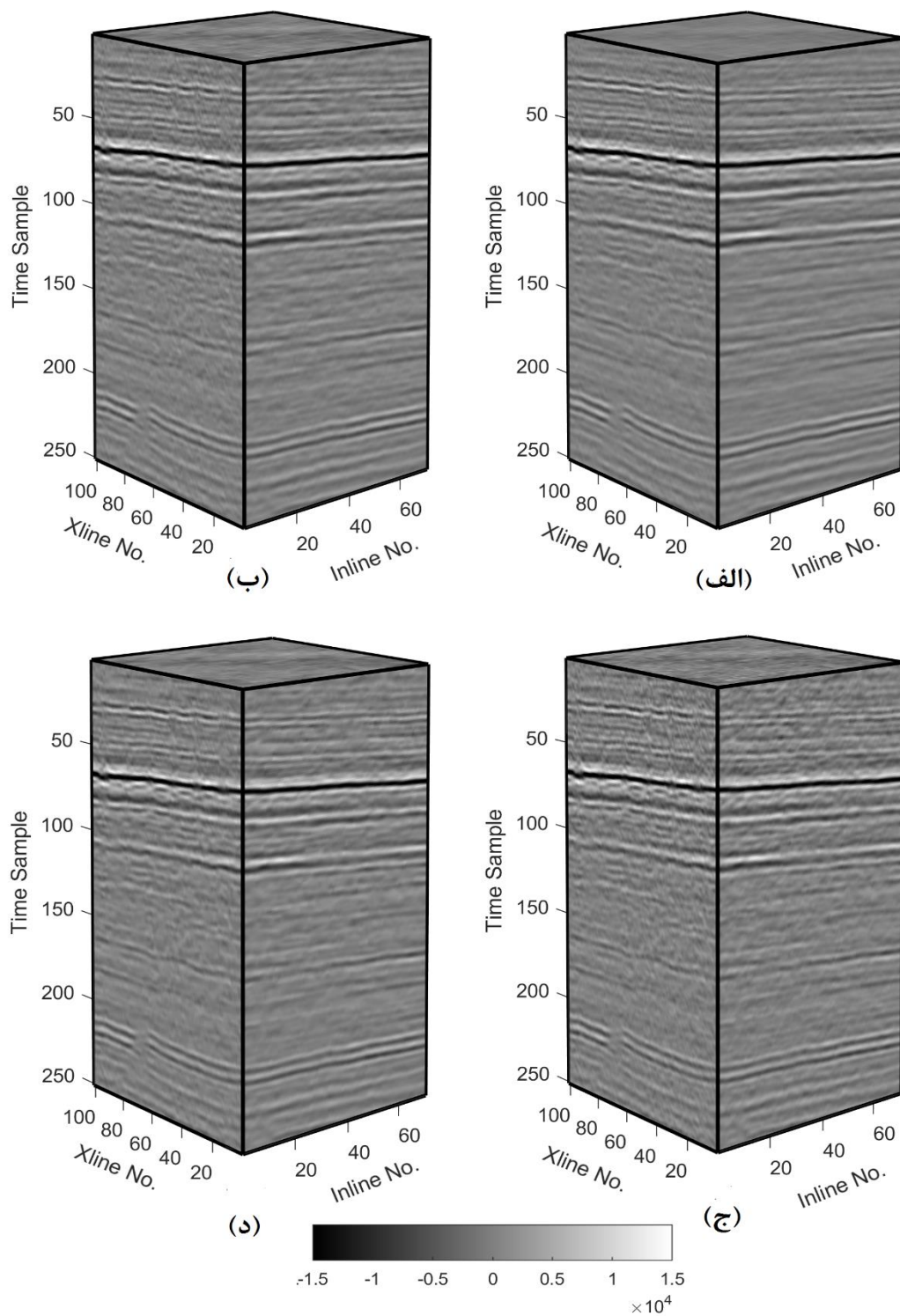
شکل ۴-۱۴: طیف دامنه میانگین داده نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱۱ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش، BM4D, IBTSVT, T-OSSVD.

جهت مقایسه بیشتر روش پیشنهادی با سه روش دیگر در نوفه‌زدایی داده لرزه‌ای، یک داده لرزه‌ای واقعی دیگر نیز توسط این چهار روش نوفه‌زدایی شده است. این داده واقعی با ۱۰۱ ردلرزه در جهت خط گیرنده و ۷۱ ردلرزه در جهت خط چشمه و ۲۵۱ نمونه زمانی با بازه نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. در این داده واقعی می‌توان رویدادهای خطی فراوانی را مشاهده کرد که به نوعی می‌تواند برای ارزیابی روش‌های نوفه‌زدایی در بازیابی رویدادهای خطی مناسب باشد، همچنین یک شکستگی طبیعی نیز مشاهده می‌شود که باعث ناپیوستگی تعدادی از لایه‌ها شده است. این داده فاقد رویدادهای منحنی و شیب‌دار می‌باشد.



شکل ۴-۱۵: داده لرزه‌ای واقعی برداشت شده در یکی از میادین نفتی.

نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی و سه روش T-OSSVD، BM4D و IBTSVT بر روی داده واقعی شکل ۴-۱۵ که حاوی گسل و رویدادهای افقی می‌باشد، در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. هرچند که این نتایج برای تمامی روش‌ها قابل قبول می‌باشد، اما نکته اساسی توانایی روش در بیشترین تضعیف نوفه تصادفی و همچنین کمترین آسیب به رویدادهای اصلی است. چرا که این داده واقعی فاقد پیچیدگی فراوان بوده و اکثر روش‌های نوفه‌زدایی با کمترین آسیب به رویدادهای اصلی داده را بازیابی می‌کنند، اما نکته قابل توجه در مورد این داده برای روش‌های ذکر شده، بیشترین نوفه تضعیف شده توسط روش مدنظر می‌باشد.

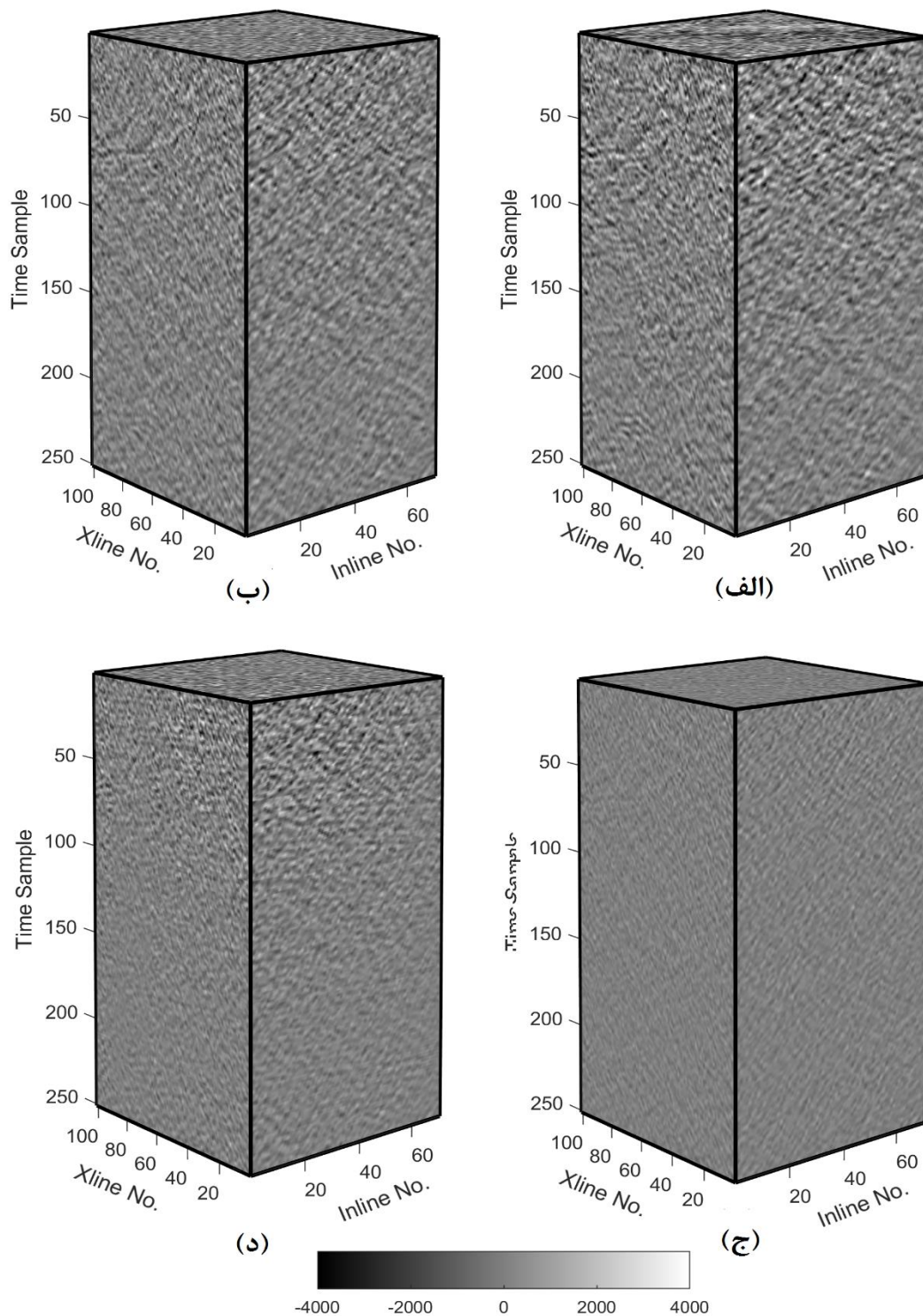


شکل ۴-۱۶: نتایج اعمال روش‌های نوفه‌زدایی بر روی داده شکل ۴-۱۵ (توسط الف) روش پیشنهادی، (ب) T-
BM4D، (ج) IBTSVT، (د) BM4D.

همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بیشترین نوفه را از این داده واقعی تضعیف نموده است، در روش پیشنهادی مقدار رتبه مؤثر برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است و

این مقدار با توجه به این که داده واقعی مورد مطالعه فقط دارای رویدادهای خطی بوده و فاقد رویدادهای شیبدار و منحنی می باشد، قابل قبول است، ابعاد بلوک های در نظر گرفته شده برای روش پیشنهادی برابر $101 \times 71 \times 502$ می باشد که ابعاد بلوک ها در این اندازه بهترین نتیجه را برای روش پیشنهادی به همراه داشته است و از دلایل آن می توان به ابعاد کوچک داده نشان داده شده در شکل ۴-۱۵ نسبت به مثال های قبل اشاره کرد. در این مثال نیز با در نظر گرفتن موجک مورلت بهترین نوفه زدایی از روش پیشنهادی حاصل می شود. در روش T-OSSVD مقدار بتا برابر یک در نظر گرفته شده است. در روش IBTSVT نیز مقدار تاو با تجربه و آزمایش برابر $\tau = \frac{200}{\sqrt{n_1 \times n_2}}$ و اندازه بلوک بندی در نظر گرفته شده برابر $5 \times 4 \times 502$ می باشد، در این حالت بهترین نوفه زدایی از این روش ارائه می شود. در روش BM4D نیز تمامی پارامترها مانند قبل و بدون تغییر در نظر گرفته شده اند. برای ارزیابی بهتر عملکرد این روش ها، تفاضل بین داده واقعی و نوفه زدایی شده با هر روش در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می شود، هر چهار روش رویدادهای اصلی را به صورت قابل قبولی بازیابی نموده و هیچ کدام از روش ها آسیب چندانی به سیگنال های اصلی وارد نکرده اند، اما همان طور که قبلاً هم اشاره شد، نکته قابل توجه در مورد این داده، مقدار نوفه تضعیف شده از آن می باشد. در روش پیشنهادی نسبت به سه روش دیگر مقدار تضعیف نوفه تصادفی بالاتر است و همچنین رویدادهای اصلی را به صورت کامل بازیابی نموده است.



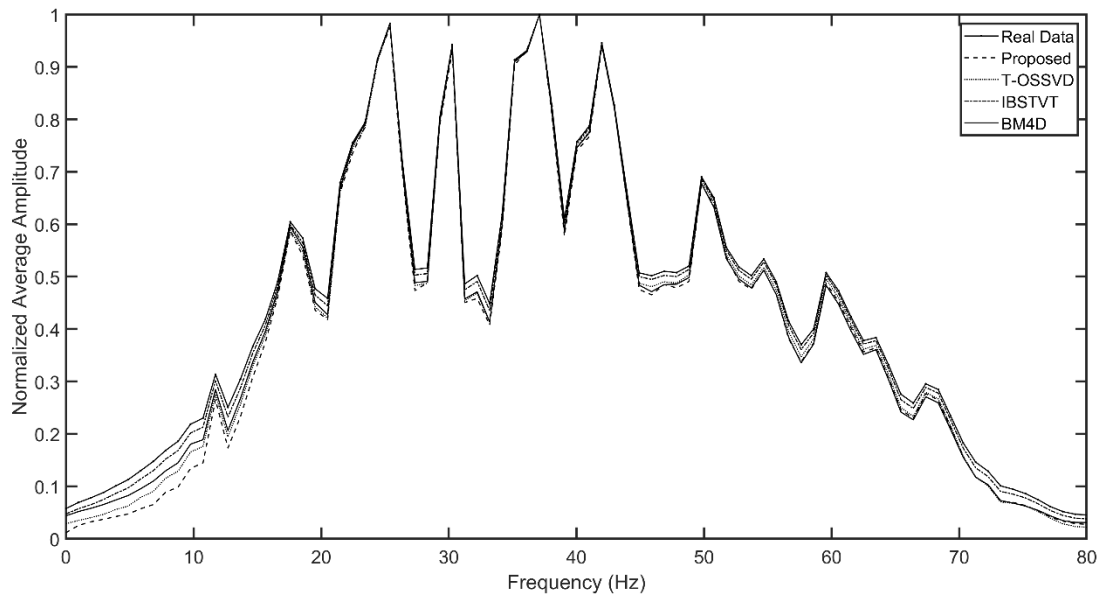
شکل ۴-۱۷: تفاضل بین داده واقعی نشان داده شده در شکل ۴-۱۵ و داده بازیابی شده توسط روش‌های (الف، الف)

پیشنهادی، (ب) T-OSSVD، (ج) IBTSVT، (د) BM4D.

طیف دامنه میانگین داده طبیعی شکل ۴-۱۵ و داده بازیابی شده توسط روش پیشنهادی و سه

روش T-OSSVD، BM4D و IBTSVT به عنوان یکی دیگر از معیارهای ارزیابی روش پیشنهادی در

شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از منحنی‌های این شکل پیداست، تمامی روش‌ها دامنه سیگنال‌های اصلی را به خوبی حفظ نموده‌اند و عملکرد آن‌ها تنها در مقدار نوفه تضعیف شده می‌باشد.



شکل ۴-۱۸: طیف دامنه میانگین داده نوفه‌دار نشان داده شده در شکل ۴-۱۵ و نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه روش BM4D, IBTSVT, T-OSSVD

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به منظور تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس با بهره گرفتن از تبدیل موجک پیوسته و اعمال آستانه گذاری و وزن‌های بهینه بر روی مقادیر تکین و بردارهای راست و چپ حاصل از تجزیه مقادیر تکین تانسور داده، یک روش پیشنهادی ارائه گردید که در آن ماتریس داده به مؤلفه‌های رتبه-پایین و تُنک تجزیه شده است. روش پیشنهادی به دلیل قدرت تفکیک مناسبی که ارائه می‌کند، نسبت به سایر روش‌های مشابه که بر پایه تجزیه داده به مؤلفه رتبه-پایین و تُنک هستند عملکرد مناسب‌تری از خود نشان داد. در این پایان‌نامه روش پیشنهادی بر روی دو داده مصنوعی سه‌بعدی حاوی رویدادهای خطی، شیب‌دار و منحنی که به نوفه تصادفی گوسی سفید آغشته بودند و دو داده واقعی حاصل از برداشت لرزه‌ای در میدین نفتی ایران اعمال شد و نتایج حاصل از روش پیشنهادی از لحاظ کمی و کیفی با نتایج حاصل از سه روش، BM4D، T-OSSVD و IBTSVT مقایسه گردید. به کارگیری روش پیشنهادی در این پایان‌نامه نشان داد که این روش در مقایسه با سه روش دیگر به‌طور مؤثری نوفه تصادفی را تضعیف می‌کند و محتوای سیگنال‌های اصلی را با کمترین آسیب حفظ می‌نماید. نتیجه‌های حاصل از اعمال روش پیشنهادی و سه روش دیگر بر روی داده‌های لرزه‌ای واقعی نشان داد که روش پیشنهادی شکل سیگنال‌های لرزه‌ای را تغییر نمی‌دهد درحالی‌که سه روش دیگر تا حدودی شکل سیگنال‌های لرزه‌ای را تغییر می‌دهند و منجر به اشتباه در شناسایی و تفسیر رویدادهای زمین‌شناسی می‌شوند. روش‌های BM4D و IBTSVT شکل و محتوای وقایع لرزه‌ای را تا حد زیادی تغییر می‌دهند و به محتوای سیگنال‌های اصلی آسیب زیادی وارد می‌کنند و یک داده بازیابی شده مناسب را ارائه نمی‌دهند، در روش T-OSSVD اگرچه این مشکل زیاد نمایان نیست اما روش پیشنهادی در مقایسه با روش T-OSSVD سیگنال‌های اصلی را بهتر حفظ می‌کند و همچنین مقدار نوفه بیشتری را از روی داده‌های لرزه‌ای تضعیف می‌نماید؛ بنابراین روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک الگوریتم قوی و مؤثر در تضعیف نوفه تصادفی موجود در داده‌های

لرزه‌ای سه‌بعدی بزرگ‌مقیاس که به سطح بالایی از نوفه تصادفی آغشته هستند، عمل کند.

به‌طور کلی می‌توان نتایج حاصل شده را به این صورت خلاصه کرد که استفاده از بلوک‌بندی در روش پیشنهادی باعث تخمین آسان‌تر و دقیق‌تر انحراف معیار نوفه (SD) از بلوک‌های کوچک‌تر داده شد که این پارامتر در تخمین مؤلفه رتبه-پایین هر بلوک مؤثر است. همچنین استفاده از تبدیل موجک پیوسته به جای تبدیل فوری سریع باعث ایجاد تفکیک‌پذیری بهتر در حوزه زمان - فرکانس گردید که این امر باعث تخمین بهتر مؤلفه رتبه-پایین و جدایش آسان‌تر سیگنال و نوفه شد و اعمال آستانه گذاری و وزن‌های بهینه بر روی مقادیر تکیین و بردارهای چپ و راست در روش پیشنهادی مقدار خطای احتمالی را به حداقل رسانده و تخمین مناسبی از مقادیر تکیین بهینه شده ارائه داد.

۵-۲ پیشنهادها

۱- در روش پیشنهادی، از تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک تبدیل زمان - فرکانس استفاده شده است، به منظور نوفه‌زدایی قوی‌تر در داده‌هایی که با پیچیدگی بالا همراه هستند و یا تعداد زیادی رویداد منحنی در داده حضور دارند، از تبدیل‌های دیگر نظیر تبدیل کرولت می‌توان استفاده کرد. چراکه تبدیل کرولت در بازایی رویدادهای منحنی توانا تر عمل می‌کند.

۲- در روش پیشنهادی می‌توان از تبدیل موجک فشرده‌شده هم‌زمان و تبدیل موجک بازچینی‌شده به جای تبدیل موجک استفاده کرد، چرا که تبدیلات فشرده‌شده هم‌زمان و بازچینی‌شده از تفکیک‌پذیری بالاتری برخوردار هستند.

مراج

- [1] Chen K. (2013) "Robust matrix rank reduction methods for seismic data processing".
- [2] Boashash B. (2015) "Time-frequency signal analysis and processing" *a comprehensive reference. Academic Press.*
- [3] انوری، ر. (۱۳۹۶) تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه ماتریس زمان فرکانس به روش انقباض بهینه. دانشگاه صنعتی شاهرود. دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک.
- [4] Li G, Li Y and Yang B. (2017) "Seismic exploration random noise on land: Modeling and application to noise suppression" *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, no. 8, pp. 4668–4681.
- [5] Gao W and Sacchi M.D. (2020) "Random noise attenuation via the randomized canonical polyadic decomposition" *Geophys. Prospect.*, vol. 68, no. 3, pp. 872–891.
- [6] Haykin S and Van Veen B. (2007) "Signals and systems" *John Wiley & Sons.*
- [7] Wiggins R, Kenny G.S and McClure C.D. (1985) "Common-depth-point method for determining and displaying the shear-velocity reflectivities of a geologic formation" *Google Patents.*
- [8] Canales L.L. (1984) "Random noise reduction" in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 525–527.
- [9] Elboth T, Presterud I.V and Hermansen D. (2010) "Time-frequency seismic data de-noising" *Geophys. Prospect.*, vol. 58, no. 3, pp. 441–453.
- [10] Huang N.E. (2014) "Hilbert-Huang transform and its applications" *World Scientific*, vol. 16.
- [11] Abma R and Claerbout J. (1995) "Lateral prediction for noise attenuation by tx and fx techniques," *Geophysics*, vol. 60, no. 6, pp. 1887–1896.
- [12] Sacchi M.D and Kuehl H. (2001) "ARMA formulation of FX prediction error filters and projection filters," *J. Seism. Explor.*, vol. 9, no. 3, pp. 185–198.
- [13] Bekara M. and Van der Baan M. (2009) "Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition," *Geophysics*, vol. 74, no. 5, pp. V89–V98.
- [14] Chen Y and Ma J. (2014) "Random noise attenuation by fx empirical-mode decomposition predictive filtering," *Geophysics*, vol. 79, no. 3, pp. V81–V91.
- [15] Huang N.E. et al. (1998) "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proc. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995.
- [16] Kreimer N and Sacchi M.D. (2012) "A tensor higher-order singular value decomposition for prestack seismic data noise reduction and interpolation," *Geophysics*, vol. 77, no. 3, pp. V113–V122.
- [17] Yang W. et al. (2015) "Application of spectral decomposition using regularized non-stationary autoregression to random noise attenuation," *J. Geophys. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 175–187.
- [18] Zhong W, YANG B and Zhang Z. (2006) "Research on application of polynomial fitting technique in highly noisy seismic data," *Prog. Geophys.*, vol.

- 1.
- [19] Ulrych T.J, Freire S and Siston P. (1988) "Eigenimage processing of seismic sections," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 1261–1265.
- [20] Chiu S.K and Howell J.E. (2008) "Attenuation of coherent noise using localized-adaptive eigenimage filter," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 2541–2545.
- [21] Cary P.W and Zhang C. (2009) "Ground roll attenuation with adaptive eigenimage filtering," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 3302–3306.
- [22] Gómez Londoño E, Castillo López L and Thaís de Souza K. (2005) "Using the Karhunen-Loeve transform to suppress ground roll in seismic data," *Earth Sci. Res. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 139–147.
- [23] Glangaud F and Mari J.L. (1990) "Spectral matrix filtering applied to VSP processing," *Rev. l'Institut français du pétrole*, vol. 45, no. 3, pp. 417–434.
- [24] Cadzow J.A. (1988) "Signal enhancement-a composite property mapping algorithm," *IEEE Trans. Acoust.*, vol. 36, no. 1, pp. 49–62.
- [25] Trickett S.R. (2002) "Fx eigenimage noise suppression," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 2166–2169.
- [26] Trickett S. (2008) "F-xy Cadzow noise suppression," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 2586–2590.
- [27] Al-Bannagi M.S, Fang K, Kelamis P. G and Douglass G.S. (2005) "Acquisition footprint suppression via the truncated SVD technique: Case studies from Saudi Arabia," *Lead. Edge*, vol. 24, no. 8, pp. 832–834.
- [28] Vautard R, Yiou P and Ghil M. (1992) "Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals," *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 58, no. 1–4, pp. 95–126.
- [29] Broomhead D.S and King G.P. (1986) "Extracting qualitative dynamics from experimental data," *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 20, no. 2–3, pp. 217–236.
- [30] Mineva A and Popivanov D. (1996) "Method for single-trial readiness potential identification, based on singular spectrum analysis," *J. Neurosci. Methods*, vol. 68, no. 1, pp. 91–99.
- [31] Sacchi M.D. (2009) "FX singular spectrum analysis," in *CSPG CSEG CWLS Convention*, pp. 392–395.
- [32] Gabor D. (1946) "Theory of communication. Part 1: The analysis of information," *J. Inst. Electr. Eng. III Radio Commun. Eng.*, vol. 93, no. 26, pp. 429–441.
- [33] Mallat S. (1999) "A wavelet tour of signal processing," *Elsevier*.
- [34] Soman K.P. (2010) "Insight into wavelets: from theory to practice," *PHI Learning Pvt. Ltd.*
- [35] Ouadfeul S.A and Aliouane L. (2014) "Random seismic noise attenuation data using the discrete and the continuous wavelet transforms," *Arab. J. Geosci.*, vol. 7, no. 7, pp. 2531–2537.
- [36] Mallat S. (2008) "A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way," *Acad. Press*, vol. 31, pp. 51–52.
- [37] Miao X and Cheadle S. (1998) "Noise attenuation with wavelet transforms," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, pp. 1072–1075.

- [38] Stockwell R.G, Mansinha L and Lowe R.P. **(1996)** "Localization of the complex spectrum: the S transform," *IEEE Trans. signal Process.*, vol. **44**, no. **4**, pp. **998–1001**.
- [39] Wigner E. **(1932)** "Phys. Rev.," *Quantum Correct. Thermodyn. Equilib.*, vol. **40**, pp.**741-749**.
- [40] Hlawatsch F and Boudreaux-Bartels G.F. **(1992)** "Linear and quadratic time-frequency signal representations," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. **9**, no. **2**, pp. **21–67**.
- [41] Cao S and Chen X. **(2005)** "The second-generation wavelet transform and its application in denoising of seismic data," *Appl. Geophys.*, vol. **2**, no. **2**, pp. **70–74**.
- [42] Donoho D.L. **(1995)** "De-noising by soft-thresholding," *IEEE Trans. Inf. theory*, vol. **41**, no. **3**, pp. **613–627**.
- [43] Boashash B and Mesbah M. **(2004)** "Signal enhancement by time-frequency peak filtering," *IEEE Trans. signal Process.*, vol. **52**, no. **4**, pp. **929–937**.
- [44] Chen* Y and Fomel S. **(2015)** "EMD-seislet transform," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists*, vol. **83**, no. **1**, , pp. **4775–4778**.
- [45] Zhao X, Li Y, Zhuang G, Zhang C and Han X. **(2016)** "2-D TFPF based on Contourlet transform for seismic random noise attenuation," *J. Appl. Geophys.*, vol. **129**, pp. **158–166**.
- [46] Lari H.H and Gholami A. **(2014)** "Curvelet-TV regularized Bregman iteration for seismic random noise attenuation," *J. Appl. Geophys.*, vol. **109**, pp. **233–241**.
- [47] Tang G and Ma J. **(2010)** "Application of total-variation-based curvelet shrinkage for three-dimensional seismic data denoising," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. **8**, no. **1**, pp. **103–107**.
- [48] Beckouche S and Ma J. **(2014)** "Simultaneous dictionary learning and denoising for seismic data," *Geophysics*, vol. **79**, no. **3**, pp. **A27–A31**.
- [49] Chen Y, Ma J and Fomel S. **(2016)** "Double-sparsity dictionary for seismic noise attenuation," *Geophysics*, vol. **81**, no. **2**, pp. **V103–V116**.
- [50] N.Siahsar M.A, Gholtashi S, Abolghasemi V and Chen Y. **(2017)** "Simultaneous denoising and interpolation of 2D seismic data using data-driven non-negative dictionary learning," *Signal Processing*, vol. **141**, pp. **309–321**.
- [51] Anvari R, Mohammadi M, R.Kahoo A, A.Khan N and Abdullah A.I. **(2020)** "Random noise attenuation of 2D seismic data based on sparse low-rank estimation of the seismic signal," *Comput. Geosci.*, vol. **135**, p. **104376**.
- [52] Amani S, Gholami A and Niestanak A.J. **(2017)** "Seismic random noise attenuation via 3D block matching," *J. Appl. Geophys.*, vol. **136**, pp. **353–363**.
- [53] Chen Y, Fomel S and Hu J. **(2014)** "Iterative deblending of simultaneous-source seismic data using seislet-domain shaping regularization," *Geophysics*, vol. **79**, no. **5**, pp. **V179–V189**.
- [54] Cheng J, Sacchi M and Gao J. **(2019)** "Computational efficient multidimensional singular spectrum analysis for prestack seismic data reconstruction," *Geophysics*, vol. **84**, no. **2**, pp. **V111–V119**.
- [55] Oropeza V and Sacchi M. **(2011)** "Simultaneous seismic data denoising and reconstruction via multichannel singular spectrum analysis," *Geophysics*, vol. **76**, no. **3**, pp. **V25–V32**.
- [56] Zhang J, Li Y and Wu N. **(2014)** "Noise attenuation for seismic data by hyperbolic-trace time-frequency peak filtering," *IEEE Geosci. Remote Sens.*

- Lett.*, vol. **12**, no. **3**, pp. **601–605**.
- [57] Anvari R, R.Kahoo A, Mohammadi M and Pouyan A. **(2017)** “Random noise attenuation in 3D seismic data by iterative block tensor singular value thresholding,” in *2017 3rd Iranian Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ICSPIS)*, pp. **164–168**.
 - [58] Daubechies I. **(1996)** “A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models,” *Wavelets Med. Biol.*, pp. **527–546**.
 - [59] Thakur G and Wu H.-T. **(2011)** “Synchrosqueezing-based recovery of instantaneous frequency from nonuniform samples,” *SIAM J. Math. Anal.*, vol. **43**, no. **5**, pp. **2078–2095**.
 - [60] Zhou T and Tao D. **(2011)** “Godec: Randomized low-rank & sparse matrix decomposition in noisy case,” in *Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning, ICML*.
 - [61] Nazari Siahsar M.A, Gholtashi S, R.Kahoo A, Marvi H and Ahmadifard A. **(2016)** “Sparse time-frequency representation for seismic noise reduction using low-rank and sparse decomposition,” *Geophysics*, vol. **81**, no. **2**, pp. **V117–V124**.
 - [62] Anvari R, R.Kahoo A, Mohammadi M, A.Khan N and Chen Y. **(2019)** “Seismic random noise attenuation using sparse low-rank estimation of the signal in the time–frequency domain,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. **12**, no. **5**, pp. **1612–1618**.
 - [63] Anvari R, N.Siahsar M.A, Gholtashi S, R.Kahoo A and Mohammadi M. **(2017)** “Seismic random noise attenuation using synchrosqueezed wavelet transform and low-rank signal matrix approximation,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. **55**, no. **11**, pp. **6574–6581**.
 - [64] Anvari R, Mohammadi M and R.Kahoo A. **(2018)** “Enhancing 3-D seismic data using the t-SVD and optimal shrinkage of singular value,” *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. **12**, no. **1**, pp. **382–388**.
 - [65] Wright J, Ganesh A, Rao S, Peng Y and Ma Y. **(2009)** “Robust principal component analysis: Exact recovery of corrupted low-rank matrices via convex optimization,” in *Advances in neural information processing systems*, pp. **2080–2088**.
 - [66] Antoine J, Murenzi R, Vandergheynst P, and Ali S.T. **(2008)** “Two-dimensional wavelets and their relatives,” *Cambridge University Press*.
 - [67] Moen H. **(2007)** “Wavelet transforms and efficient implementation on the GPU.”
 - [68] Panchamkumar D.S. **(2003)** “Complex Wavelet Transforms and Their Applications,” *Master Philos. (M. Phil.)*, *Signal Process. Div. Dep. Electron. Electr. Eng. Univ. Strat. United Kingdom*.
 - [69] Fugal D.L. **(2009)** “Conceptual wavelets in digital signal processing: an in-depth, practical approach for the non-mathematician,” *Space & Signals Technical Pub*.
 - [70] Polikar R. **(1996)** “The wavelet tutorial.”
 - [71] Mertins A and Mertins D.A. **(1999)** “Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications,” *John Wiley & Sons, Inc*.
 - [72] Strang G. and Borre K. **(1997)** “Linear algebra, geodesy, and GPS,” *Siam*.
 - [73] Datta B.N. **(2010)** “Numerical linear algebra and applications,” *Siam*. vol. **116**.
 - [74] Gavish M and Donoho D.L. **(2017)** “Optimal shrinkage of singular values,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. **63**, no. **4**, pp. **2137–2152**.
 - [75] Golub G.H, Hoffman A and Stewart G.W. **(1987)** “A generalization of the Eckart-Young-Mirsky matrix approximation theorem,” *Linear Algebra Appl.*, vol. **88**, pp. **317–327**.

- [76] Chen P and Suter D. **(2006)** “An analysis of linear subspace approaches for computer vision and pattern recognition,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. **68**, no. **1**, pp. **83–106**.
- [77] Naghizadeh M and Sacchi M. **(2013)** “Multidimensional de-aliased Cadzow reconstruction of seismic records,” *Geophysics*, vol. **78**, no. **1**, pp. **A1–A5**.
- [78] Candes E.J and Plan Y. **(2010)** “Matrix completion with noise,” *Proc. IEEE*, vol. **98**, no. **6**, pp. **925–936**.
- [79] Candès E.J, Li X, Ma Y and Wright J. **(2011)** “Robust principal component analysis?,” *J. ACM*, vol. **58**, no. **3**, pp. **1–37**.
- [80] Chen L, Liu Y, and Zhu C. **(2017)** “Iterative block tensor singular value thresholding for extraction of lowrank component of image data,” *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. **1862–1866**.
- [81] Dong X, Zhong T and Li Y. **(2020)** “New Suppression Technology for Low-Frequency Noise in Desert Region: The Improved Robust Principal Component Analysis Based on Prediction of Neural Network,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*
- [82] Cichocki A, et al. **(2015)** “Tensor decompositions for signal processing applications: From two-way to multiway component analysis,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. **32**, no. **2**, pp. **145–163**.
- [83] De Lathauwer L, De Moor B and Vandewalle J. **(2000)** “A multilinear singular value decomposition,” *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, vol. **21**, no. **4**, pp. **1253–1278**.
- [84] Nadakuditi R. **(2014)** “Optshrink: An algorithm for improved low-rank signal matrix denoising by optimal, data-driven singular value shrinkage,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. **60**, no. **5**, pp. **3002–3018**.
- [85] Proakis J.G. and Manolakis D.G. **(2004)** “Digital signal processing,” *PHI Publ. New Delhi, India*.

Abstract

Noises in seismic data are divided into two general categories, coherent noises and non-coherent noises (random). Coherent noises from one trace to another trace have a definite trend, while random noises are uncorrelated and do not have a definite trend from one trace to another, and occur as random oscillations in all the length and frequency are emitted along with the original signal. Random noise attenuation in seismic data requires employing leading edge methods to attain reliable denoised data. Efficient noise removal, effective signal preservation and recovery, reasonable processing time with the minimum signal distortion and seismic event deterioration are properties of a desired noise suppression algorithm. There are various noise attenuation methods available that more or less contains these properties. The tensor optimal shrinkage singular value decomposition (T-OSSVD) method contains all the aforementioned properties and is supposed to be an efficient noise suppression method. It faces with problem in effective extraction of low rank of the signal and therefore efficient noise elimination, specifically in high noise contaminated seismic data from subsurface complex structures disturbing the wave propagation in the media. Here we improve performance of the T-OSSVD method by employing continuous wavelet transform (CWT) in the algorithm for extracting the singular values and new method for singular values shrinkage. The noise removal procedure could be performed more efficiently in the wavelet domain with the optimized coefficient compared to the T-OSSVD. For performance evaluation of the proposed method, it was applied on two synthetic and a field data examples and results were compared with the competitive random noise suppression methods, the T-OSSVD, the IBTSVT and the BM4D algorithms. Qualitative and quantitative comparison of the proposed method with those of other methods depicted that it could more efficiently eliminate random noise from seismic data.

Key words: Random noise attenuation, Time-Frequency domain, Continuous wavelet transform, OptShrink, Singular value decomposition, Low-Rank matrix



Shahrood University of Technology
School of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.S. Thesis

Seismic random noise attenuation using low-rank component estimation by multi-scale tensor decomposition

Javad Mafakheri

Supervisor:

Dr. Amin Roshandel Kahoo

Dr. Mohammad Radad

Advisor:

Rasoul Anvari

Dr. Mehrdad Soleimani Monfared

January, 2021