

تضعیف نوفه لرزه‌ای همدوس با استفاده از ترکیب روش‌های تبدیل S تعمیم‌یافته و تجزیه مُد تجربی

فرید کریمی^۱، امین روشندل کاهو^{۱*} و حمیدرضا سیاه‌کوهی^۲

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

۲- موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۰

چکیده

داده‌های لرزه‌ای برداشت شده عموماً با نوفه همراه هستند. یکی از مهم‌ترین نوفه‌ها در عملیات خشکی، نوفه زمین‌غلت است. نوفه زمین‌غلت از گروه نوفه‌های همدوس بوده و دارای سرعت کمتر، فرکانس پایین‌تر و دامنه قوی‌تری نسبت به سیگنال‌هاست و به دلیل پاششی بودنش، در دورافت‌های نزدیک در اعماق کم و در دورافت‌های دورتر در اعماق زیاد، سیگنال‌های بازتابی را در یک منطقه بادبزی شکل می‌پوشاند. روش‌های متعددی برای تضعیف این نوفه وجود دارد که متداول‌ترین آنها، استفاده از فیلترهای فرکانسی یک بعدی، دو بعدی و فیلترهای سرعتی است. در این مقاله از روش فیلتر کردن جدیدی با استفاده از ترکیب تبدیل S تعمیم‌یافته و تجزیه مُد تجربی برای تضعیف نوفه همدوس زمین‌غلت استفاده شده است. بدین ترتیب که داده لرزه‌ای از حوزه $t-x$ با استفاده از تبدیل S تعمیم‌یافته به حوزه $t=f-x$ انتقال داده می‌شود. سپس در این حوزه تجزیه مُد تجربی در راستای مکان برای یک زمان و فرکانس خاص اعمال می‌گردد. برای تضعیف نوفه همدوس زمین‌غلت، اولین تابع مُد ذاتی که مربوط به محدوده عدد موج بالا یا رویدادهای لرزه‌ای همدوس با شیب تند هستند، حذف می‌گردد و سپس با استفاده از معکوس تجزیه مُد تجربی و تبدیل معکوس S داده‌ها به حوزه $t-x$ منتقل می‌شوند که نوفه زمین‌غلت آن تضعیف شده است. کارآیی این روش بر روی داده‌های لرزه‌ای واقعی مورد بررسی قرار گرفته است و با روش تجزیه مُد تجربی در حوزه $f-x$ مقایسه گردیده است. نتایج، برتری روش معرفی شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نوفه همدوس، نوفه زمین‌غلت، تبدیل S تعمیم‌یافته، تجزیه مُد تجربی و داده لرزه‌ای

حدی تحت تأثیر قرار می‌دهد که استفاده از آن بدون انجام پردازش غیرممکن است. لذا مرحله تضعیف نوفه همواره از اصلی‌ترین مراحل پردازش به شمار می‌آید. نوفه زمین‌غلت^۱ دسته مهمی از نوفه‌های همدوس همراه داده‌های لرزه‌ای خشکی

مقدمه

حضور نوفه در هنگام برداشت داده لرزه‌ای اجتناب‌ناپذیر بوده و در برخی موارد سیگنال را تا

1. Ground-roll Noise

روش، سیگنال به یک سری موج‌های نوسانی با میانگین صفر تجزیه می‌گردد.

در این مقاله بر اساس ایده معرفی شده توسط بکارا و وندربان در سال ۲۰۰۹ میلادی [۱۳] و هن-پنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی [۱۵] نوفه زمین‌غلت از رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای تضعیف می‌شوند. بکارا و وندربان ابتدا داده‌ها را با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه $f-x$ منتقل نمودند و سپس با اعمال تجزیه مد تجربی و حذف اولین تابع مد ذاتی، نوفه‌های همدوس و ناهمدوس را از روی داده‌ی لرزه‌ای بازتابی حذف کردند [۱۳]. از آنجایی که امواج لرزه‌ای دارای محتوای فرکانسی متغیر با زمان می‌باشند، تبدیل فوریه و حوزه $f-x$ برای تجزیه و تحلیل این سیگنال‌ها چندان مناسب نمی‌باشد. لذا هن-پنگ و همکاران ایده استفاده از تبدیل زمان - فرکانس را به جای تبدیل فوریه مطرح نمودند [۱۵]. به عبارت دیگر فرآیند تجزیه مد تجربی و حذف اولین تابع مد ذاتی در حوزه $t-f-x$ بر روی داده اعمال می‌گردد. یکی از تبدیل‌های زمان - فرکانس متداول که امروزه کاربرد وسیعی در لرزه‌شناسی دارد، تبدیل S و انواع بهبود یافته آن می‌باشد. در این مقاله به منظور بررسی کارایی روش معرفی شده، نتایج آن با روش بکارا و وندربان [۱۳] مقایسه شده است.

تبدیل S تعمیم یافته

تبدیل S یک سیگنال $x(t)$ با رابطه (۱) نشان داده می‌شود [۱۶].

$$s_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w(t - \tau, f) e^{-i2\pi f \tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ x(\tau) \frac{1}{\sigma(f)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma(f)^2}} e^{-i2\pi f \tau} \right\} d\tau \quad (1)$$

یکی از مزیت‌های تبدیل S نسبت به تبدیل فوریه زمان کوتاه، این است که انحراف معیار σ تابعی از فرکانس f است که به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (2)$$

می‌باشند که دارای فرکانس پایین، دامنه بالا و سرعت کمی می‌باشند [۱]. این امواج پاششی بوده و رویدادهای بازتابی را می‌پوشانند و باعث افت کیفیت داده‌های لرزه‌ای می‌شوند [۲]. به دلیل پاششی بودن امواج زمین‌غلت، این امواج به صورت بادبزنی در رکورد چشمه مشترک مشاهده می‌شوند و رویدادهای بازتابی کم عمق را در دورافت‌های نزدیک و رویدادهای عمیق را در دورافت‌های دور می‌پوشانند [۳]. اگر نوفه‌های زمین‌غلت تضعیف نشوند، مانعی برای تهیه تصویر مناسبی از لایه‌های زیر سطحی خواهند بود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای تضعیف نوفه زمین‌غلت ارائه شده است. بسیاری از روش‌های متداول با استفاده از ابزاری که خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای را در نظر نمی‌گرفتند نظیر فیلتر $f-k$ ، تجزیه مقادیر تکین، فیلتر وینر و تبدیل رادون، نوفه‌های زمین‌غلت داده‌های لرزه‌ای را تضعیف می‌نمودند [۴-۹]. به منظور بهبود نتایج، روش‌هایی مبتنی بر تبدیل‌های زمان فرکانس معرفی شدند که خاصیت ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای را در نظر می‌گرفتند. به همین منظور با استفاده از تبدیل موجک [۱۰] و تبدیل کرولت نوفه زمین‌غلت را از داده‌های لرزه‌ای تضعیف نمودند. یارهام و همکاران از تبدیل کرولت [۱۱] به منظور تضعیف امواج زمین‌غلت استفاده نمودند. عسکری و سیاه‌کوهی با توجه به تفاوت بین امواج سطحی و امواج بازتابی در حوزه $f-k$ ، با استفاده از ترکیب تبدیل S و تبدیل $x-f-k$ توانستند امواج سطحی را تضعیف نمایند [۱۲]. بکارا و وندربان نیز در سال ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از تجزیه مد تجربی در حوزه $f-x$ ، نوفه‌های زمین‌غلت را از داده‌های لرزه‌ای تضعیف نمودند [۱۳].

تجزیه مد تجربی [۱۴] به منظور تجزیه سیگنال با یک هدف فضایی و برای تحلیل کردن داده‌های غیرخطی و ناپایا ابداع شد. در این روش بر اساس فرآیندی موسوم به غربال کردن، توابع مد ذاتی (IMFs) به دست می‌آیند. در واقع در این

شامل مدهای ذاتی نوسانی ساده متفاوتی است. هر مُد ذاتی یک نوسان ساده است که تعداد نقاط بیشینه و کمینه و نقاط صفر آنها برابر است [۱۴]. یک داده ممکن است در یک زمان دارای چندین مُد ذاتی باشد. این مدهای نوسانی را با توابع مُد ذاتی (IMF) نشان می‌دهند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

۱- در تمام مجموعه داده، تعداد اکسترمم‌ها و تعداد عبور از صفر باید با هم برابر و یا حداکثر یک واحد اختلاف داشته باشند.

۲- در هر نقطه، مقدار میانگین پوش تعریف شده توسط بیشینه‌های محلی و پوش تعریف شده توسط کمینه‌های محلی باید صفر باشد. به عبارت دیگر یک IMF باید تابعی متقارن حول صفر باشد. بر پایه دو شرط فوق، فرآیند غربال کردن برای محاسبه IMF های یک سیگنال به صورت زیر استفاده می‌شود [۱۴]:

- ۱- تعیین نقاط بیشینه و کمینه محلی سیگنال $x(t)$.
- ۲- به دست آوردن پوش بالایی و پایینی سیگنال $x(t)$ با استفاده از برازش نقاط بیشینه و کمینه محلی به روش اسپلاین مکعبی^۱.
- ۳- محاسبه میانگین پوش بالا و پایین داده با نام $m_1(t)$.
- ۴- محاسبه اختلاف میان داده و میانگین پوش بالا و پایین مطابق رابطه (۶).

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (6)$$

مراحل ۱ تا ۴ یک تکرار از فرآیند غربال کردن را نشان می‌دهد. چنانچه $h_1(t)$ دارای دو شرط مربوط به توابع مُد ذاتی باشد، به عنوان یک تابع مد ذاتی سیگنال در نظر گرفته می‌شود و فرآیند غربال کردن متوقف می‌شود. اما چنانچه $h_1(t)$ دارای دو شرط مذکور نباشد، بایستی مراحل ۱ تا ۴ بر روی $h_1(t)$ تکرار شد تا شرط‌های مذکور در آن وجود داشته باشد.

به منظور افزایش قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی برای فرکانس‌های بالا و پایین، تبدیل‌های S تعمیم‌یافته‌ای معرفی شدند که هر کدام با استفاده از یک پارامتر اضافه نسبت به تبدیل S متداول، قدرت تفکیک را در راستای زمان و فرکانس افزایش دادند. در این تبدیل S تعمیم‌یافته‌ای که در این مقاله از آن استفاده می‌شود، پارامتر اضافی δ در تعریف انحراف معیار استفاده می‌شود و رابطه ۲ به صورت رابطه ۳ تغییر می‌کند [۱۷].

$$\sigma(f) = \frac{\delta}{|f|} \quad (3)$$

بنابراین تبدیل S تعمیم‌یافته به صورت رابطه (۴) خواهد بود.

$$s_x(t, f, \delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ x(\tau) \frac{|f|}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2\delta^2}} e^{-i2\pi f\tau} \right\} d\tau \quad (4)$$

اگر در رابطه ۳، δ کوچک باشد، پنجره گوسی پهن‌تر می‌شود. بنابراین وضوح فرکانسی در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد. اگر δ بزرگ باشد، پنجره گوسی باریک‌تر می‌شود که نتیجه آن کاهش وضوح زمانی در فرکانس‌های پایین می‌باشد. بنابراین مقدار پارامتر δ باید به گونه‌ای انتخاب شود که قدرت تفکیک مناسبی در صفحه نمایش زمان - فرکانس بدست آید. تغییرات پهنای تابع پنجره با مقادیر δ به ازای فرکانس ۲۵ Hz در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مقاله تغییرات پارامتر δ با فرکانس به صورت رابطه ۵ استفاده شده است [۱۷].

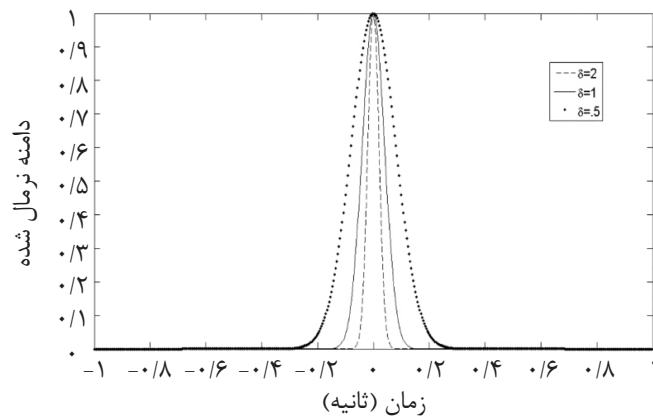
$$\delta(f) \approx \alpha f \quad (5)$$

که α شیب خط است و مثبت در نظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن ویژگی‌های این تبدیل، S تعمیم‌یافته روی یک سیگنال مصنوعی ناپایا با موجک‌های ریکر با فرکانس‌های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ هرتز تولید شد و طیف دامنه تبدیل S متداول و تعمیم‌یافته آن با یکدیگر مقایسه گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است.

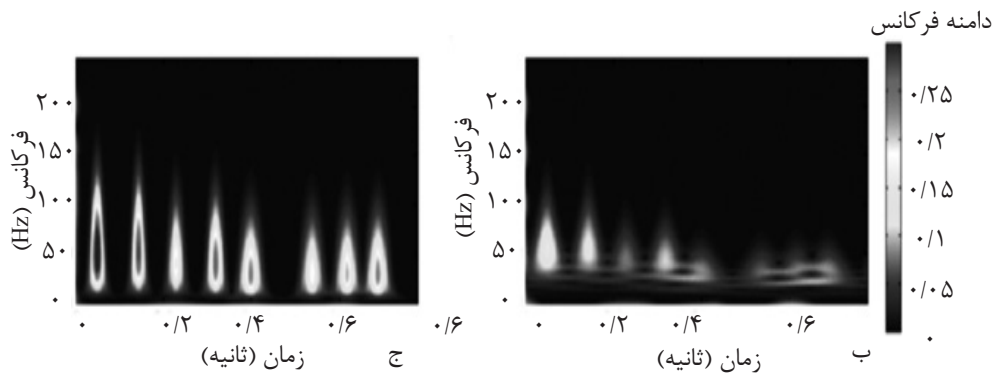
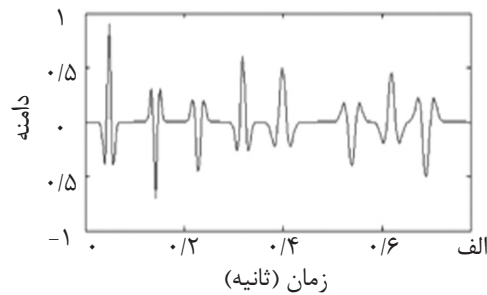
تجزیه مد تجربی

اساس نظریه تجزیه مد تجربی را یک فرضیه ساده تشکیل می‌دهد. مطابق این فرضیه هر داده‌ای،

1. Cubic Spline



شکل ۱- پنجره گوسی نرمال شده برای مقادیر متفاوت δ به ازای تک فرکانس ۲۵ Hz



شکل ۲- سیگنال مصنوعی با صفحه زمان- فرکانس (الف) سیگنال ناپایا مصنوعی موجک ریکر با فرکانس‌های ۳۵، ۲۵ و ۴۵ Hz؛ (ب) نمودار صفحه زمان- فرکانس تبدیل S استاندارد مربوط به ج) نمودار صفحه زمان- فرکانس تبدیل S تعمیم یافته مربوط به شکل ۲ (الف).

۵- محاسبه باقی مانده مطابق رابطه (۷).

داد:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_1(t) + r_n(t) \quad (۸)$$

$$r_1(t) = x(t) - imf_1(t) \quad (۷)$$

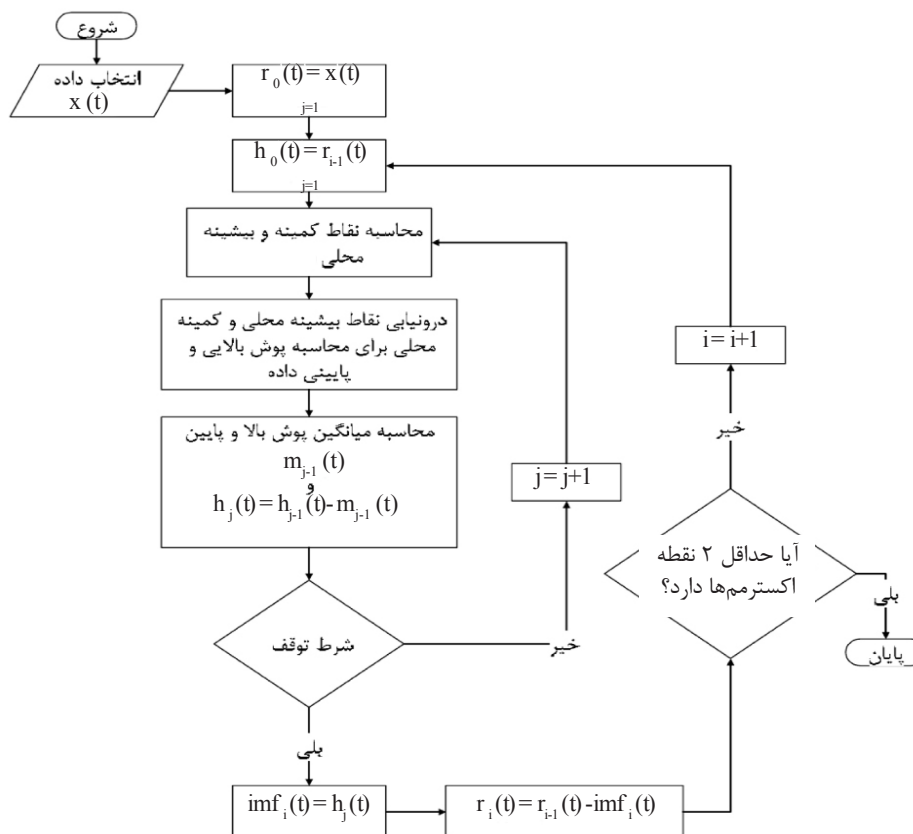
در شکل ۳ نمودار گردشی تجزیه یک سیگنال به مدهای تجربی آن نشان داده شده است.

۶- چنانچه باقی مانده دارای حداقل دو اکستریم باشد، مراحل ۱ تا ۵ تکرار می شود و در غیر این صورت الگوریتم متوقف می شود و آخرین باقی مانده به عنوان باقی مانده سیگنال اولیه در نظر گرفته می شود.

روش کار

در این مقاله با استفاده از ترکیب تبدیل S تعمیم یافته و تجزیه مُد تجربی، نوفه همدوس زمین‌غلت از رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای تضعیف می گردد.

بنابراین یک سیگنال مانند $x(t)$ را می توان پس از تجزیه به مدهای تجربی به صورت رابطه ۸ نمایش

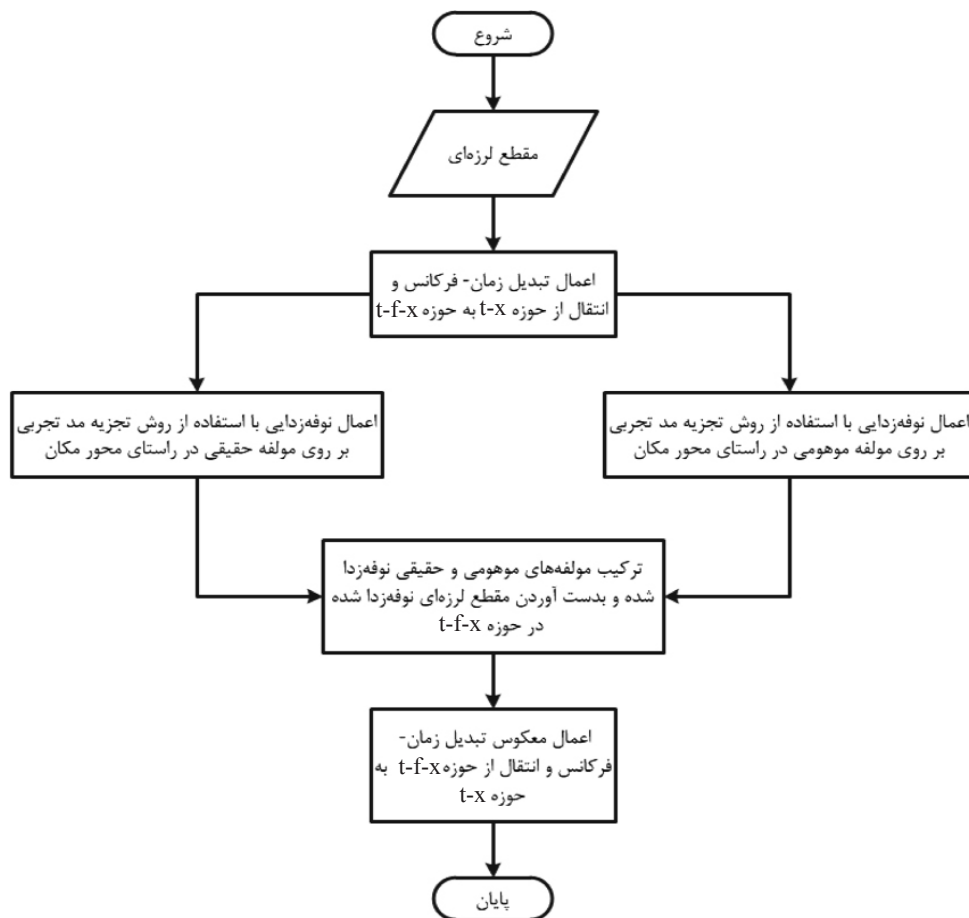


شکل ۳- نمودار گردش تجزیه یک سیگنال به مدهای تجربی (تعمیم یافته از [۱۴])

در S تعمیم‌یافته به حوزه t - f - x انتقال داده می‌شود. در مرحله بعد بایستی مؤلفه‌های عدد موج بالا را برای تضعیف نوفه زمین‌غلت، تضعیف نمود. برای این منظور تجزیه مُد تجربی در حوزه t - f - x در راستای محور مکان اعمال می‌گردد. با حذف اولین تابع مُد ذاتی مؤلفه‌های عدد موج بالا که غالباً مربوط به امواج زمین‌غلت می‌باشند، تضعیف می‌شوند. البته لازم به‌ذکر است که به‌دلیل اینکه داده‌ها در حوزه t - f - x حالت مختلط دارند، لذا مراحل فوق بایستی به‌صورت جداگانه بر روی مؤلفه‌های حقیقی و موهومی انجام شوند. سپس با جمع توابع مُد ذاتی باقی‌مانده در حوزه t - f - x ، مؤلفه‌های حقیقی و موهومی جدیدی به‌دست می‌آیند. با برگردان این مؤلفه‌ها با استفاده از تبدیل S معکوس به حوزه t - x ، رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای نوفه‌زدا شده به‌دست می‌آید. نمودار گردش این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.

در رکورد چشمه مشترک، نوفه زمین‌غلت به‌دلیل سرعت کم با شیب تند، سهم بزرگی در انرژی عدد موج بالا دارد. از آنجایی که اولین تابع مُد ذاتی در تجزیه مُد تجربی دارای مؤلفه‌های نوسانات زیاد می‌باشد، می‌توان انتظار داشت که مؤلفه‌های فرکانس بالا مربوط به یک سیگنال زمانی یا مؤلفه‌های عدد موج بالا در یک سیگنال مکانی در این تابع مُد ذاتی قرار گیرند. بکارا و وندربان در سال ۲۰۰۹ با اعمال تجزیه مُد تجربی در حوزه f - x در راستای مکان، با حذف اولین تابع مُد ذاتی توانستند نوفه‌های زمین‌غلت را در داده‌های لرزه‌ای تضعیف نمایند [۱۳]. اما می‌توان به‌دلیل ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای، به‌جای تبدیل فوریه از تبدیل‌های زمان-فرکانس استفاده نمود و نتایج را بهبود بخشید.

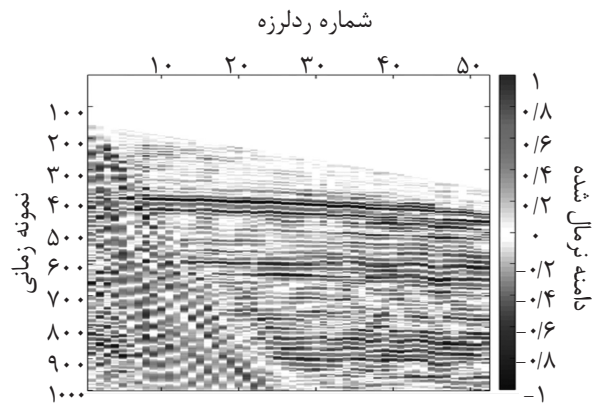
ابتدا به منظور انجام محاسبات سریع، لازم است که رکورد چشمه مشترک در راستای زمانی، پنجره‌ای شوند. سپس، پنجره مورد نظر با استفاده از تبدیل



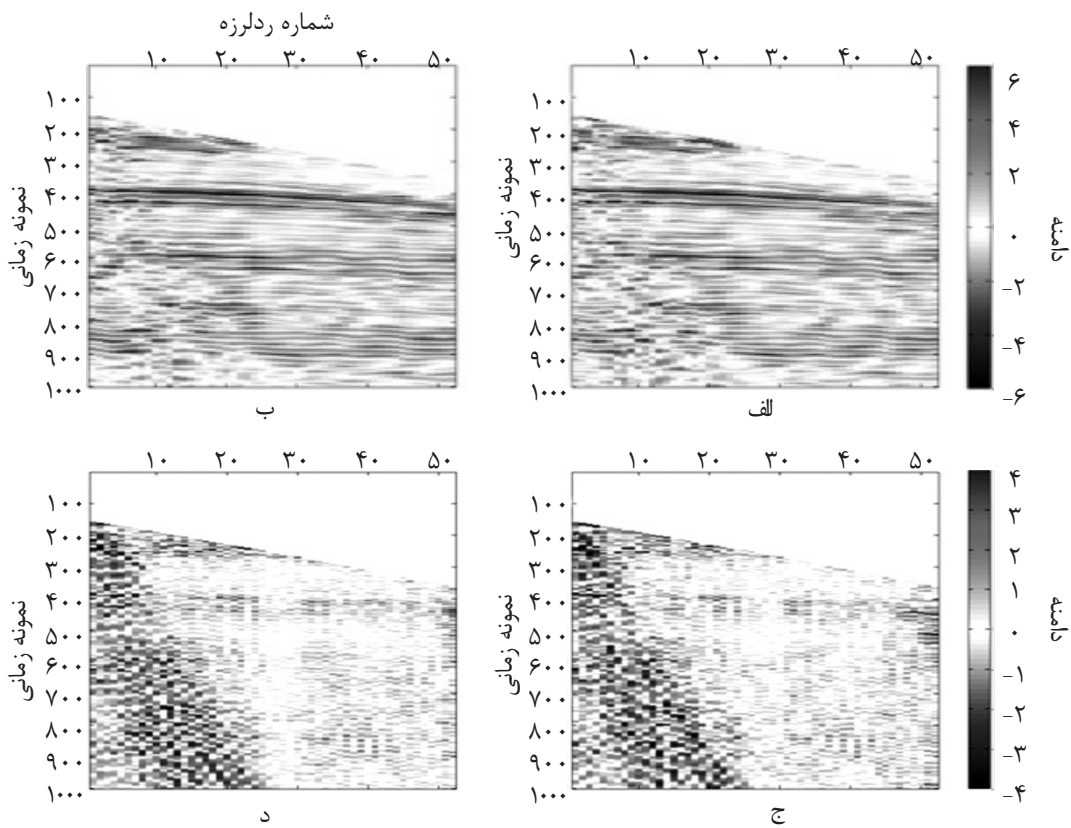
شکل ۴- نمودار گردش‌تضعیف نوفه تصادفی با استفاده از ترکیب تبدیل زمان-فرکانس و تجزیه مد تجربی

با یکدیگر مقایسه گردید. اولین ردلرزه از ناحیه‌ای انتخاب گردید که نوفه زمین‌غلت وجود داشته باشد و عملکرد دو روش بر روی تضعیف آن و تاثیر آن‌ها بر روی سیگنال مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور ردلرزه ۱۲ انتخاب شد. ردلرزه دو که ردلرزه ۵۰ می‌باشد، از ناحیه‌ای می‌باشد که نوفه زمین‌غلتی وجود نداشته باشد تا اثر هر دو الگوریتم بر روی سیگنال مورد بررسی قرار گیرد. از مقایسه طیف دامنه این دو ردلرزه می‌توان مشاهده نمود که در محدوده فرکانسی مربوط به نوفه زمین‌غلت، روش تبدیل S تعمیم‌یافته عملکرد بهتری نسبت به تبدیل فوریه دارد و نوفه زمین‌غلت بیشتری را تضعیف نموده است. همچنین تاثیر مخرب الگوریتم بر روی طیف دامنه و شکل موج مربوط به سیگنال در روش تبدیل فوریه بیشتر از تبدیل S تعمیم یافته می‌باشد.

به منظور بررسی عملکرد این روش، رکورد چشمه مشترک واقعی که دارای ۵۲ ردلرزه و فاصله نمونه‌برداری مکانی ۵۰ m و ۱۰۰۰ نمونه زمانی در هر ردلرزه با فاصله نمونه‌برداری زمانی ۲ ms انتخاب گردید که در شکل ۵ نشان داده شده است. الگوریتم نشان داده شده در این مقاله و الگوریتم بکارا و وندربان بر روی این رکورد واقعی اعمال گردید. نتایج حاصل شده از هر دو روش در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین اختلاف میان رکورد واقعی و رکورد نتیجه نیز در این شکل نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش تبدیل S تعمیم‌یافته نسبت به تبدیل فوریه نوفه زمین‌غلت بیشتری را تضعیف نموده است و همچنین آسیب کمتری به رویدادهای لرزه‌ای وارد نموده است. به منظور بررسی بیشتر، طیف دامنه دو ردلرزه از رکورد لرزه‌ای واقعی محاسبه و



شکل ۵- رکورد چشمه مشترک



شکل ۶- نتایج نوفه‌زدایی با استفاده از الف) الگوریتم ترکیب تبدیل فوریه و حذف اولین تابع مُد ذاتی؛ ب) الگوریتم ترکیب تبدیل S تعمیم‌یافته و حذف اولین تابع مُد ذاتی؛ ج) اختلاف میان رکورد واقعی حاوی نوفه با نتیجه الف) و د) اختلاف میان رکورد واقعی حاوی نوفه با نتیجه ب).

نتیجه‌گیری

مقابل تبدیل‌های زمان-فرکانس که ابزار مناسب تحلیل سیگنال‌های ناپایا می‌باشد، نداشته باشد. نتایج حاصل شده نیز نشان می‌دهد که اعمال تجزیه مد تجربی و حذف اولین IMF در حوزه $t-f-x$ نسبت به $f-x$ برای تضعیف نوفه زمین‌گلت در رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای عملکرد بهتری داشته و همچنین آسیب کمتری به رویدادهای بازتابی وارد نموده است.

در این مقاله، تضعیف نوفه زمین‌گلت با استفاده از ترکیب تبدیل S تعمیم‌یافته و تجزیه مد تجربی با حذف اولین IMF در دو حوزه تبدیل S تعمیم‌یافته و فوریه انجام شده است. بر اساس خاصیت محتوای فرکانسی متغیر با زمان داده‌های لرزه‌ای، می‌توان انتظار داشت که به دلیل فوریه که ابزار مناسبی برای این‌گونه سیگنال‌ها نمی‌باشد، عملکرد مناسبی در

دارد، اما با توجه به آسیبی که به رویدادهای بازتابی می‌رساند و نوفه همدوس کمتری تضعیف می‌کند، استفاده از تبدیل زمان-فرکانس که زمان بیشتری برای اجرا نیاز دارد، به آن ترجیح داده می‌شود.

حفظ بهتر سیگنال‌های بازتابی توسط روش حوزه t - f - x نسبت به حوزه f - x هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس قابل مشاهده است. البته لازم به ذکر است که استفاده از تبدیل فوریه زمان کمتری نیاز

مراجع

- [1]. Sheriff R. E. and Geldart L. P., "Exploration seismology," 2nd ed., Cambridge University Press, 1995.
- [2]. Pujol J., "Elastic wave propagation and generation in seismology," Cambridge University Press, 2003.
- [3]. Claerbout J. F., "Ground roll and radial traces: Stanford Exploration Project Report," SEP, 35, 1983.
- [4]. March D. W. and Baily A. D., "A review of the two dimensional transform and its use in seismic processing," First Break., Vol. 1, pp. 9-21, 1983.
- [5]. Liu J. and Marfurt K. J., "3-D high resolution radon transforms applied to ground roll suppression in orthogonal seismic surveys," 74th SEG Annual International Meeting, pp. 2144-2147, 2004.
- [6]. Yilmaz O., "Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data," SEG, 2001.
- [7]. Kendall R., Jin S., and Ronen S., "An SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data," 75th SEG Annual International Meeting, pp. 928-932, 2005.
- [8]. Porsani M. J., Silva M. G., Melo P. E. M., and Ursin B., "Groundroll attenuation based on SVD filtering," 79th SEG Annual International Meeting, pp. 3381-3385, 2009.
- [9]. Montagne R. and Vasconcelos G. L., "Optimized suppression of coherent noise from seismic data using the Karhunen-Loeve transform," Physical Review, Vol. 74, pp. 1-9, 2006.
- [10]. Deighan A. J. and Watts D. R., "Ground-roll suppression using the wavelet transform," Geophysics, Vol. 62, pp. 1896-1903, 1997.
- [11]. Yarham C., Boeniger U., and Herrmann F. J., "Curvelet-based ground roll removal," 76th SEG Annual International Meeting, pp. 2777-2782, 2006.
- [12]. Askari R. and Siahkoohi H. R., "Ground roll attenuation using s and x - f - k transforms," Geophysical Prospecting, Vol. 56, pp. 105-114, 2008.
- [13]. Bekara M. and Van der Baan M., "Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition," Geophysics, Vol. 74, pp. V89-V98, 2009.
- [14]. Huang N. E. and Shen S. S., "Hilbert-Huang transform and its applications," World Scientific, 2005.
- [15]. Han-Peng C., Zhen-Hua H., and De-Ji H., "Seismic data denoising based on mixed time-frequency methods," Applied Geophysics, Vol. 8, pp. 319-327, 2011.
- [16]. Stockwell R. G., Mansinha L., and Lowe R., "Localization of the complex spectrum: The S-transform," IEEE Trans. Signal Process, Vol. 44, pp. 998-1001, 1996.
- [17]. Sahu S. S., Panda G., and George N. V., "An improved S-transform for time-frequency analysis," Advance Computing Conference, pp. 315-319, 2009.