



## تضعیف نوفه زمین غلت با استفاده از تبدیل موجک گسسته در حوزه ردلرزه شعاعی

حسام حسین نیا<sup>۱\*</sup>، امین روشندل کاهو<sup>۲\*</sup> و بهزاد تخمچی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶

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

### واژگان کلیدی

### چکیده

داده‌های لرزه‌ای بازتابی اغلب آلوده به نوفه‌های همدوس می‌باشند که بازتاب‌های مورد نیاز برای استخراج یک تصویر دقیق زیرسطحی را می‌پوشانند. یکی از مهم‌ترین نوفه‌های لرزه‌ای همدوس نوفه زمین‌غلت است که دارای محدوده فرکانسی پایین، دامنه بالا و سرعت پایینی است و در سراسر و نزدیک سطح زمین گسترش پیدا می‌کند. این نوفه اغلب بازتاب‌های کم‌عمق را در دورافت‌های نزدیک و بازتاب‌های عمیق را در دورافت‌های دور می‌پوشاند و اطلاعات مفید حاصل از اکتشافات لرزه‌ای را پنهان می‌کند. از این‌رو نوفه زمین‌غلت یک مشکل همیشگی در تصویرسازی لرزه‌ای است و تضعیف این دسته از نوفه‌ها یک مرحله ضروری در پردازش داده‌های لرزه‌ای خشکی به حساب می‌آید. روش‌های زیادی برای تضعیف این نوفه‌ها معرفی شده است. در این مقاله، به منظور تضعیف نوفه همدوس از تبدیل موجک در حوزه ردلرزه شعاعی استفاده شده است. این روش بر اساس کاربرد مشترک تبدیل موجک گسسته دو بعدی و تبدیل ردلرزه شعاعی برای تضعیف نوفه همدوس و به طور خاص نوفه زمین‌غلت است. چون تبدیل ردلرزه شعاعی، رخداد‌های خطی در حوزه دورافت-زمان ( $x-t$ ) را به رخداد‌های عمودی در حوزه سرعت ظاهری-زمان ( $r-t$ ) تبدیل می‌کند، لذا یک محیط کار مطلوب برای تبدیل موجک گسسته دو بعدی فراهم می‌کند. نتایج به دست آمده از داده‌های واقعی به خوبی بهتر بودن روش پیشنهادی را نسبت به فیلتر  $f-k$  اثبات می‌کند. همچنین، نتایج نشان داد که الگوریتم در مقابل تغییرات اندک مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی و نوع موجک تبدیل موجک گسسته دوبعدی پایدار بوده و تغییر چشم‌گیری در نتایج ایجاد نشده و خروجی تقریباً یکسانی تولید می‌کند.

تبدیل موجک گسسته دو بعدی

تبدیل ردلرزه شعاعی

نوفه زمین غلت

تضعیف نوفه همدوس

## ۱- مقدمه

داده لرزه‌ای بازتابی همواره آلوده به انواع گوناگونی از نوفه‌ها هستند. به طور کلی نوفه‌های لرزه‌ای به دو دسته تقسیم می‌شوند: همدوس و ناهمدوس (ایلماز، ۲۰۰۱). برخلاف نوفه تصادفی که در بعد مکانی ناهمدوس است، نوفه همدوس معمولاً در بعد مکانی همدوس است که به تضعیف این نوفه‌ها از داده‌های لرزه‌ای بازتابی با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال ساده کمک می‌کند (شریف و جلدات، ۱۹۹۵). نوفه زمین‌غلت یکی از مهم‌ترین انواع نوفه‌های لرزه‌ای همدوس است که معمولاً به صورت پاششی و با محتوای فرکانسی پایین و دامنه بالا نسبت به رویدادهای بازتابی در برداشت‌های لرزه‌ای خشکی مشاهده می‌شوند و اطلاعات مفید بازتابی را پنهان می‌کند (گادالا و فیشر، ۲۰۰۵). نوفه زمین‌غلت اغلب بازتاب‌های کم‌عمق را در دورافت‌های نزدیک و بازتاب‌های عمیق را در دورافت‌های دور می‌پوشاند و باید قبل از فرآیندهای پردازشی بعدی تضعیف شود (چن و همکاران، ۲۰۱۵).

تضعیف نوفه‌های همدوس از جمله نوفه زمین‌غلت همواره یک چالش جدی برای پردازشگرهای داده‌های لرزه‌ای است. تحقیقات زیادی درباره تضعیف نوفه زمین‌غلت در گذشته صورت گرفته است و تعداد زیادی از نویسندگان روش‌های متعددی را برای تضعیف نوفه زمین‌غلت در داده‌های لرزه‌ای معرفی کرده‌اند. یکی از متداول‌ترین روش‌ها فیلتر باندگذر (ایلماز، ۲۰۰۱) است. در مواقعی که نوفه زمین‌غلت دامنه‌های قابل توجهی فقط در فرکانس‌های پایین‌تر از باند فرکانسی سیگنال دارد، یک فیلتر باندگذر فرکانسی ساده ابزاری مناسب برای تضعیف این‌گونه از نوفه‌ها است (گادالا و فیشر، ۲۰۰۵). البته در مواردی که نوفه و سیگنال همپوشانی باند فرکانسی داشته باشند، فیلتر فرکانسی باندگذر عملکرد خوبی در تضعیف نوفه ندارد و ممکن است بخشی از انرژی‌های بازتابی مفید را از بین ببرد. چن و همکاران (۲۰۱۵) برای حل مشکل همپوشانی فرکانسی در فیلتر باندگذر، روشی ساده اما مؤثر معرفی کردند. ایشان با اعمال یک فرایند متعامدسازی محلی، پس از اعمال یک فیلتر باندگذر متداول، نوفه‌های زمین‌غلت دارای همپوشانی با سیگنال بازتابی را به گونه‌ای تضعیف نمودند؛ که کمترین آسیب را به سیگنال بازتابی وارد نماید. یک روش متداول دیگر برای تضعیف نوفه زمین‌غلت، فیلتر شیب است؛ که به فیلتر  $f-k$  نیز مشهور است و اساس کار آن تبدیل فوریه دوبعدی (پروآکیس و مانولاکیس، ۲۰۰۷) است. در تبدیل فوریه دوبعدی (طیف  $f-k$ ) یک رکورد لرزه‌ای قبل از برانبارش، مرز جدایش واضحی بین ناحیه سیگنال و نوفه وجود ندارد. در نتیجه، در اثر فیلتر کردن نوفه زمین‌غلت در طیف  $f-k$  به سیگنال بازتابی آسیب وارد می‌شود (گودرزی و ریاحی، ۲۰۱۲). به منظور جداسازی محتوای فرکانسی و عدد موج نوفه زمین‌غلت و داده‌های بازتابی می‌توان از تبدیل‌هایی مانند تبدیل رادون (radon transform)، تبدیل  $\tau-p$  و تبدیل ردلرزه شعاعی (radial trace transform) استفاده نمود

(هنلی، ۲۰۰۳؛ راسل و همکاران، ۱۹۹۰؛ بریسک و مک‌کوان، ۱۹۸۶). تبدیل ردلرزه شعاعی یک روش مؤثر را برای تضعیف زمین‌غلت در رکوردهای لرزه‌ای قبل از برانبارش پیشنهاد می‌کند (ژو و همکاران، ۲۰۰۴). دسته مهمی از روش‌های تضعیف نوفه زمین‌غلت که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش‌های مبتنی بر تجزیه مقدار تکین می‌باشند (کندال و همکاران، ۲۰۰۵؛ پورسانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیما و پورسانی، ۲۰۱۵).

داده‌های لرزه‌ای معمولاً به دلیل خاصیت ذاتی زمین دارای محتوای فرکانسی متغیر با زمان هستند (ایلماز، ۲۰۰۱). با این وجود، همه روش‌های گفته شده در بالا با ماهیت طبیعی داده‌های لرزه‌ای به دلیل در نظر گرفتن فرض پایایی سیگنال لرزه‌ای مغایرت دارند. امروزه روش‌های نوینی معرفی شده‌اند که طبیعت ناپایایی داده لرزه‌ای را در نظر می‌گیرند. الگوریتم تضعیف نوفه زمان-فرکانس یک روش مؤثر برای حل این مشکل است (البوت و همکاران، ۲۰۱۰). یارهام و همکاران (۲۰۰۶) و یارهام و هرمن (۲۰۰۸) روشی برای تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از تبدیل کماتک ارائه کردند. عسکری و سیاه‌کوهی (۲۰۰۸) با استفاده از تبدیل  $t-f-k$  و تبدیل  $s$  نوفه زمین‌غلت را تضعیف کردند. کارسلی و بایراک (۲۰۰۸) از یک روش بر اساس فیلتر وینر و مزایای تصویرسازی زمان-فرکانس برای تضعیف زمین‌غلت استفاده کردند. لیو و فومل (۲۰۱۳) از تبدیل زمان-فرکانس محلی به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت استفاده نمودند. تعداد زیادی از روش‌های تضعیف نوفه زمین‌غلت که ناپایا بودن داده‌های لرزه‌ای را در نظر می‌گیرند؛ از انواع مختلف تبدیل موجک (پیوسته، گسسته، یک بعدی و دو بعدی) استفاده می‌کنند (دیقان و واتس، ۱۹۹۷؛ کورسو و همکاران، ۲۰۰۳؛ گودرزی و ریاحی، ۲۰۱۲؛ آلمیدا و همکاران ۲۰۱۵).

آلمیدا و همکاران (۲۰۱۵) روشی بر اساس کاربرد مشترک تبدیل موجک گسسته دو بعدی و تبدیل شعاعی به منظور تضعیف نوفه همدوس، به طور خاص زمین‌غلت معرفی کردند. در این مقاله، ضمن تشریح کامل روش پیشنهادی آلمیدا و همکاران (۲۰۱۵)، از آن به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت استفاده می‌شود. همچنین تأثیر فاکتورهای مختلف بر روی کارایی روش مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد و در نهایت، نتایج آن با نتایج روش متداول  $f-k$  مقایسه می‌شود.

## ۲- روش‌شناسی تحقیق

روش مورد استفاده در این مقاله برای تضعیف نوفه زمین‌غلت بهره‌مندی از دو ابزار تبدیل موجک گسسته دو بعدی و تبدیل ردلرزه شعاعی است؛ که در ادامه به معرفی هر کدام از آن‌ها پرداخته می‌شود.

## ۲-۲- تبدیل موجک گسسته دو بعدی

تبدیل فوریه ابزار مناسبی برای آنالیز سیگنال‌های پایا است؛ اما برای سیگنال‌هایی مانند ردلرزه که محتوای فرکانسی آن‌ها با زمان تغییر می‌کند، به خوبی عمل نمی‌کند (بوآشاش، ۲۰۱۵). نمایش‌های چند قدرت تفکیکی مانند تبدیل موجک (مالات، ۲۰۰۸) برای آنالیز سیگنال‌های یک بعدی و دوبعدی بسیار مؤثر است. در آنالیز موجک، تبدیل موجک گسسته (DWT) یک سیگنال را به مجموعه‌ای از توابع پایه موجک متعامد تجزیه می‌کند و در واقع ابزاری است که سیگنال را به مؤلفه‌های فرکانسی مختلف تجزیه می‌کند و سپس هر مؤلفه را با قدرت تفکیک مطابق با مقیاس آن مورد تحلیل قرار می‌دهد (مالات، ۱۹۸۹).

تبدیل موجک گسسته دو بعدی یک تعمیم ساده از تبدیل موجک گسسته یک بعدی است. این تبدیل از بانک‌های فیلتر شامل فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر به منظور تجزیه یک تصویر یا سیگنال دو بعدی در سطوح مختلف استفاده می‌کند. فرایند تجزیه شامل هم‌میخت بانک فیلتر و سیگنال دو بعدی است؛ که پس از آن یک مرحله کاهش نمونه (sampling down) بر روی نتیجه هم‌میخت اعمال می‌گردد (مالات، ۲۰۰۸). خروجی هر مرحله از تجزیه شامل چهار باند مختلف است (کوهن و چن، ۱۹۹۳)؛ که به صورت شماتیک در شکل ۲ مراحل تبدیل موجک گسسته دو بعدی برای یک مرحله تجزیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ابتدا، یک مرحله تجزیه با تبدیل موجک گسسته یک بعدی بر روی سطرهای سیگنال دو بعدی انجام می‌شود. سپس، یک مرحله تجزیه دیگر با تبدیل موجک گسسته یک بعدی بر روی ستون‌های سیگنال دو بعدی خروجی مرحله قبل انجام می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتیجه این دو مرحله تبدیل موجک گسسته یک بعدی، یک تصویر تبدیل شده با چهار باند مجزا است؛ که شامل باندهای (۱) LL، (۲) LH، (۳) HL و (۴) HH است. L نشان‌دهنده اعمال فیلتر پایین‌گذر و H نشان‌دهنده اعمال فیلتر بالاگذر است. باند LL، مربوط به یک تقریب کلی از سیگنال دو بعدی اصلی است. باند LH، ویژگی‌های افقی محلی و باند HL، ویژگی‌های عمودی محلی در سیگنال دوبعدی را نمایان می‌کنند. باند HH، ویژگی‌های قطری را در تصویر اصلی آشکار می‌سازد (کوهن و چن، ۱۹۹۳). در این مقاله فاکتور تلفات (decimation factor) برابر با ۲ و نوع بان فیلتر مورد استفاده از نوع quadrature mirror filter bank است.

شکل ۳ یک تصویر تجزیه شده یک سطحی به وسیله تبدیل موجک گسسته دوبعدی و ضرایب به دست آمده آن با موجک هار را نشان می‌دهد. باید توجه کرد که حداکثر (نقاط سفید) و حداقل (نقاط سیاه) LH در اطراف حاشیه‌های سطری قرار می‌گیرد. در حالی که حداکثر و حداقل HL نزدیک حاشیه‌های ستونی هستند و حداکثر و حداقل HH نزدیک حاشیه‌های قطری می‌باشند.

## ۱-۲- تبدیل ردلرزه شعاعی

تبدیل ردلرزه شعاعی یک عمل نگاشت ساده است که دامنه‌های لرزه‌ای  $S(x, t)$  از مختصات دورافت-زمان سیر  $x-t$  را به سرعت ظاهری یا زاویه-زمان سیر  $v-t$  تبدیل می‌کند (هنلی، ۲۰۰۳). این تبدیل به یک مبدأ با مختصات  $(x_0, t_0)$  نیاز دارد؛ که مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی است. این تبدیل مطابق رابطه (۱) انجام می‌شود (هنلی، ۱۹۹۹).

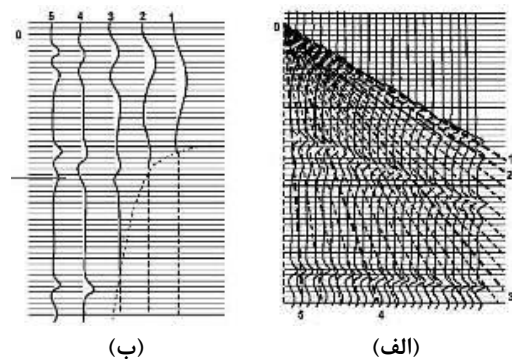
$$R\{S(x, t)\} = S'(v, t') \quad (1)$$

که  $S'(v, t')$  تبدیل ردلرزه شعاعی داده لرزه‌ای  $S(x, t)$  است و رابطه (۲) ارتباط میان مختصات قدیم و جدید را در تبدیل بیان می‌نماید.

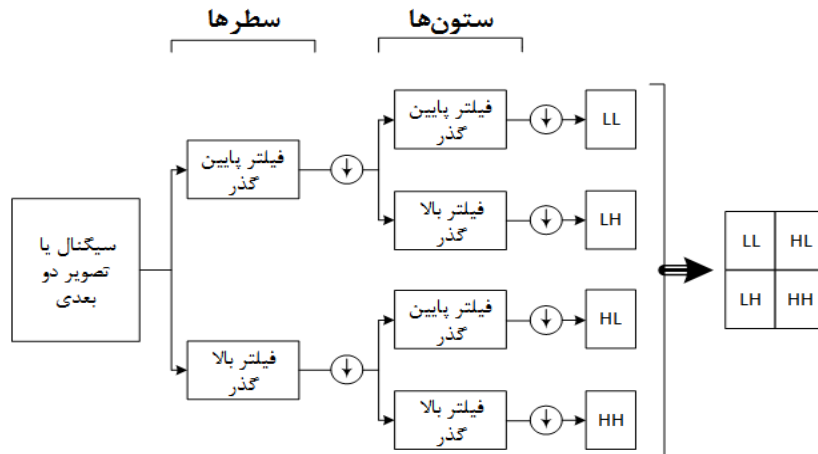
$$\begin{aligned} t' &= t - t_0 \\ v &= \frac{x - x_0}{t - t_0} \end{aligned} \quad (2)$$

این تبدیل معکوس‌پذیر است و می‌توان داده را از حوزه ردلرزه شعاعی به حوزه دورافت-زمان سیر برگرداند.

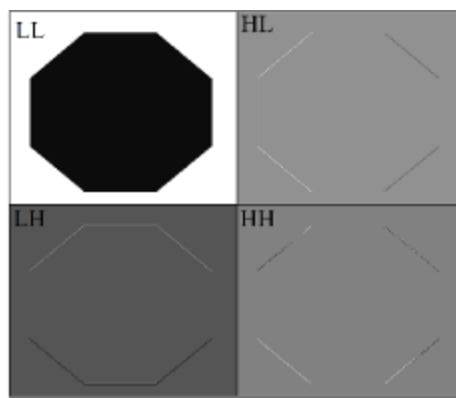
مبدأ می‌تواند در هر جایی از رکورد لرزه‌ای قرار داده شود و ممکن است منطبق بر مبدأ داده‌ها  $(x=0, t=0)$  باشد. شکل ۱ تصویری شماتیک از فرآیند تبدیل دامنه‌های لرزه‌ای یک رکورد چشمه مشترک از حوزه متداول دورافت-زمان  $(x-t)$  به حوزه ردلرزه شعاعی  $(v-t)$  را نشان می‌دهد. از آنجایی که در هر دو حوزه  $x-t$  و  $v-t$  مختصات زمان یکسان و بدون تغییر است، تبدیل ردلرزه شعاعی فرکانس رخداد‌های تقریباً افقی را تغییر نمی‌دهد؛ در حالی که فرکانس رخداد‌های شیب‌دار در این حوزه کاهش می‌یابد (هنلی، ۲۰۰۳).



شکل ۱: تصویر شماتیک از تبدیل ردلرزه شعاعی. (الف) رکورد چشمه مشترک لرزه‌ای (ب) ردلرزه شعاعی استخراج شده از حوزه  $x-t$  با استفاده از مجموعه‌ای از دامنه‌های لرزه‌ای در امتداد یک مسیر خطی با سرعت یا زاویه ثابت (هنلی، ۲۰۰۳).



شکل ۲: تجزیه سیگنال دو بعدی به وسیله تبدیل موجک گسسته دوبعدی در اولین سطح.



(ب)



(الف)

شکل ۳: (الف) تصویر سیاه سفید اصلی و (ب) نتیجه تبدیل موجک گسسته دوبعدی یک سطحی از تصویر اصلی.

### ۲-۳- تبدیل موجک شعاعی

از آنجایی که تبدیل ردلرزه شعاعی رویدادهای خطی در حوزه دورافت-زمان سیر را به رویدادهای عمودی در حوزه ردلرزه شعاعی تبدیل می‌کند؛ لذا یک محیط کار مناسب برای تبدیل موجک گسسته دو بعدی فراهم می‌شود. به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت با استفاده از روش تبدیل موجک شعاعی، ابتدا رکورد لرزه‌ای چشمه مشترک به حوزه ردلرزه شعاعی منتقل می‌شود. سپس به منظور یک مرحله تجزیه، تبدیل موجک گسسته دو بعدی بر روی رکورد چشمه مشترک در حوزه ردلرزه شعاعی اعمال می‌شود. با توجه به ویژگی‌های ذاتی چهار باند حاصل از تبدیل موجک گسسته دوبعدی و نوفه زمین‌غلت، بیشترین انرژی نوفه زمین‌غلت عمدتاً در باند قائم (HL) ظاهر خواهد شد. سیگنال نوفه‌زدا شده از طریق حذف باند قائم (HL) و برگردان نتیجه حاصل با استفاده از تبدیل معکوس موجک گسسته دو بعدی و تبدیل معکوس ردلرزه شعاعی به حوزه دورافت-زمان سیر به دست می‌آید؛ بنابراین الگوریتم تضعیف نوفه زمین‌غلت را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- انجام تبدیل ردلرزه شعاعی بر روی رکورد لرزه‌ای چشمه

مشترک.

- انجام تبدیل موجک گسسته دو بعدی و انجام یک مرحله تجزیه.
- حذف ضرایب باند عمودی حاصل از تبدیل موجک گسسته دو بعدی.
- انجام تبدیل موجک معکوس گسسته دو بعدی بر روی ضرایب باقیمانده.
- انجام تبدیل معکوس ردلرزه شعاعی و بازگشت به حوزه دورافت-زمان.

لازم به ذکر است که می‌توان مراحل تجزیه با استفاده از تبدیل موجک گسسته دوبعدی را تا بیش از یک مرحله نیز ادامه داد تا فرایند جدایش سیگنال و نوفه زمین‌غلت بهتر صورت پذیرد. البته در مواردی که نوفه زمین‌غلت دارای الگوی پاششی بسیار پیچیده‌ای نباشد، اغلب نوفه زمین‌غلت در یک مرحله تجزیه از سیگنال بازتابی تفکیک می‌شود؛ ولی در موارد الگوی پاششی بسیار پیچیده، نیاز به تعداد مراحل بیشتر تجزیه است.

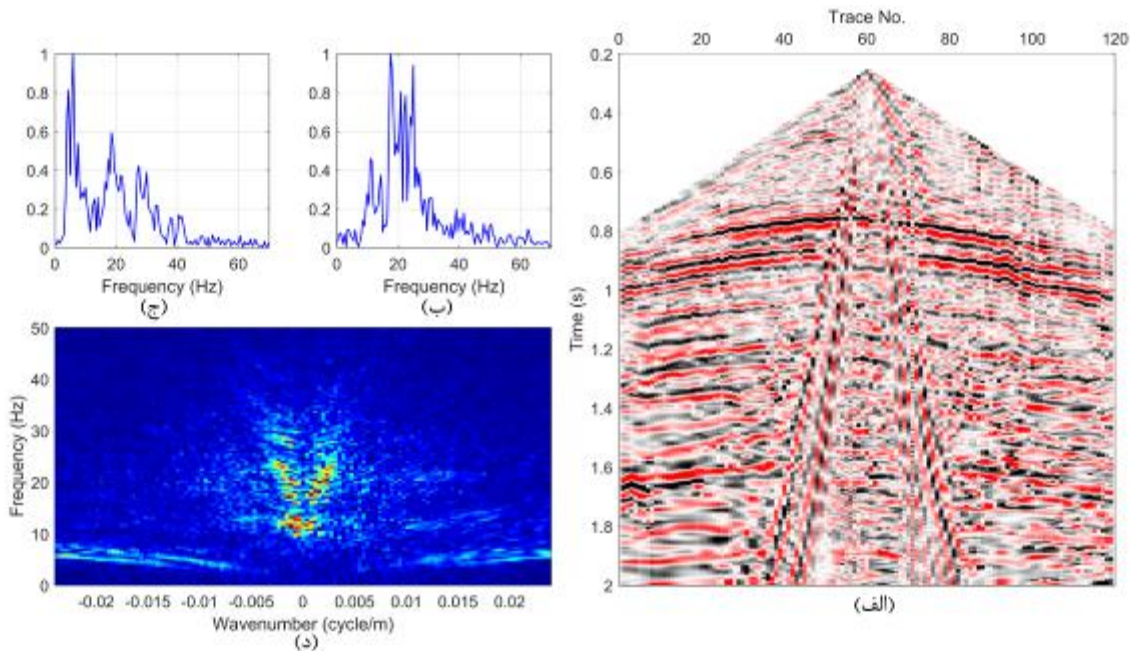
شعاعی استفاده شده است. در شکل ۵-الف) رکورد چشمه مشترک واقعی در حوزه ردلرزه شعاعی نشان داده شده است. مطابق الگوریتم مورد استفاده در مقاله، در مرحله بعد، تبدیل موجک گسسته دو بعدی با موجک مادر db5 (daubechies) بر روی رکورد چشمه مشترک در حوزه ردلرزه شعاعی برای به دست آوردن ۴ باند مختلف اعمال گردید که در شکل‌های ۵-ب) تا ۵-ه) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی امواج زمین‌غلت به صورت مجزا از رویدادهای بازتابی در باند قائم قرار گرفته است؛ بنابراین مطابق روند الگوریتم، ضرایب باند قائم حذف و معکوس تبدیل موجک گسسته دو بعدی بر روی ضرایب باقیمانده اعمال گردید؛ که نتیجه آن در شکل ۵-و) نشان داده شده است. رکورد چشمه مشترک فیلتر شده را می‌توان با استفاده از اعمال معکوس تبدیل ردلرزه شعاعی بر روی خروجی مرحله قبل (شکل ۵-و) به دست آورد؛ که در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به تضعیف نوفه زمین‌غلت -ویژگی‌های شاخص آن که در شکل ۴ قابل مشاهده بود- یعنی مؤلفه فرکانسی پایین با دامنه بالا در طیف دامنه ردلرزه شماره ۴۷ (شکل ۴-ج) و رویداد خطی فرکانس پایین و عدد موج بالا در طیف f-k (شکل ۴-د)، به شدت در شکل ۶ کاهش پیدا کرده است.

به منظور بررسی و مقایسه عملکرد روش پیشنهادی، یکی از روش‌های مرسوم تضعیف نوفه زمین‌غلت به نام فیلتر f-k انتخاب گردید و بر روی داده‌های واقعی مورد نظر (شکل ۴) اعمال شد.

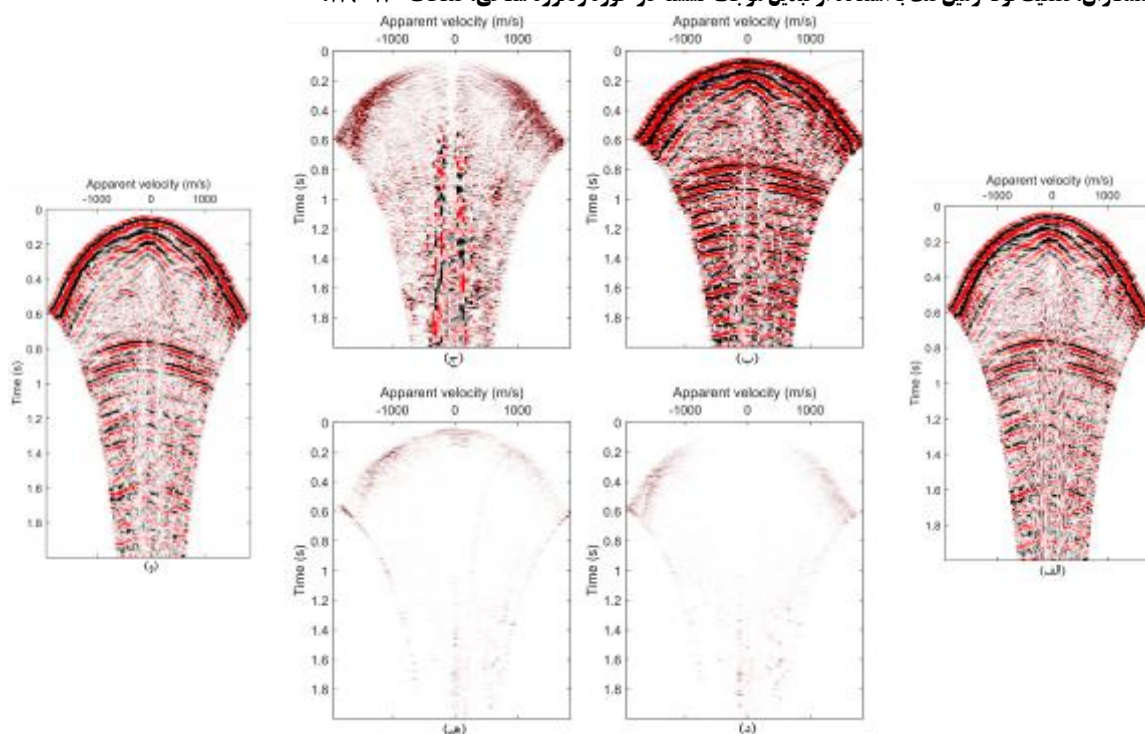
### ۳- داده‌های واقعی

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی یک رکورد چشمه مشترک واقعی از مجموعه داده‌های آزمایشی موجود در نرم‌افزار ویستا (Vista)، انتخاب گردید. در این داده، فاصله نمونه‌برداری زمانی ۰/۰۰۲ و فاصله نمونه‌برداری مکانی ۲۰ متر است. محل چشمه در وسط پروفیل گیرنده قرار گرفته است و لذا رکورد چشمه مشترک از نوع متقارن است. رکورد چشمه مشترک بعد از تقویت دامنه و حذف انرژی‌های رسید مستقیم در شکل ۴-الف) نشان داده شده است. به منظور بررسی بیشتر، طیف f-k و طیف دامنه مربوط به دو ردلرزه شماره ۱۵ و ۴۷ (ردلرزه شماره ۱۵ فاقد انرژی نوفه زمین‌غلت و ردلرزه شماره ۴۷ دارای انرژی نوفه زمین‌غلت است) به ترتیب در شکل‌های ۴-ب)، ۴-ج) و ۴-د) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه‌های با دامنه بالا در فرکانس‌های پایین در طیف دامنه ردلرزه شماره ۴۷ وجود دارند که مربوط به نوفه زمین‌غلت است. چنین مؤلفه‌ای در طیف دامنه ردلرزه شماره ۱۵ وجود ندارد. همچنین، در طیف f-k نیز رویدادهای تقریباً خطی با سرعت کم که در نزدیکی محور عدد موج قرار گرفته‌اند، حضور نوفه زمین‌غلت را در رکورد چشمه مشترک نشان می‌دهد.

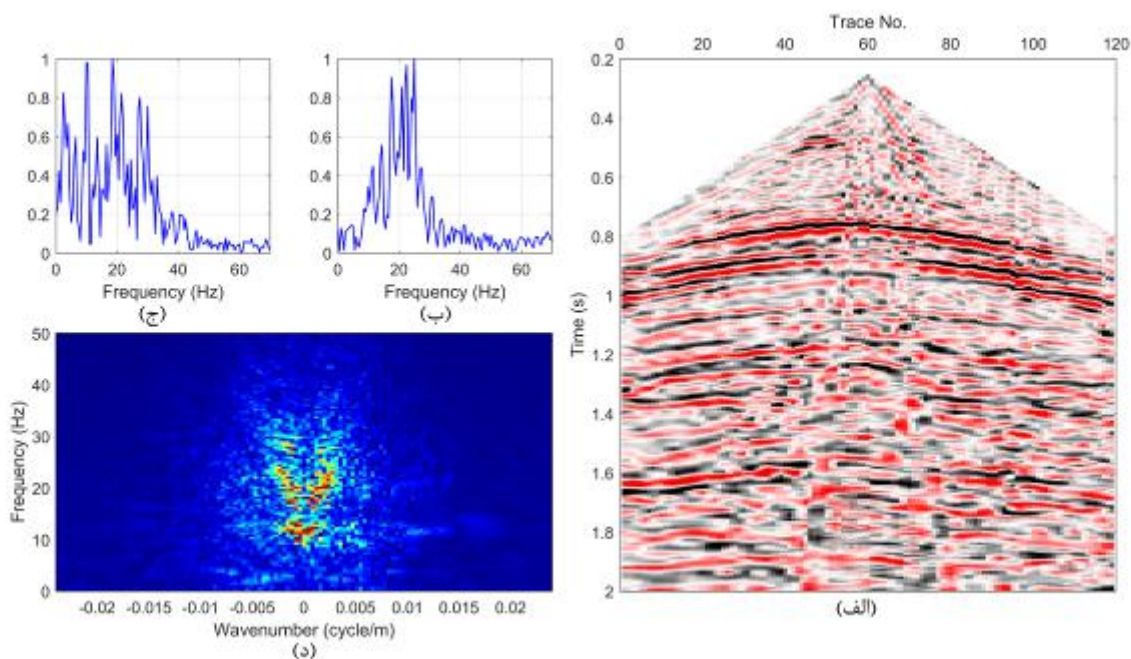
به منظور تضعیف نوفه زمین‌غلت، روش پیشنهادی بر روی رکورد چشمه مشترک واقعی مورد نظر به کار گرفته شد. برای این منظور، مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی به صورت  $x_0 = 0 \text{ m}$  و  $t_0 = 0 \text{ s}$  در نظر گرفته شد و سرعت ظاهری از  $-5000$  تا  $+5000$  متر بر ثانیه و تعداد ۴۵۰ ردلرزه شعاعی برای انجام تبدیل ردلرزه



شکل ۴: الف) یک رکورد چشمه مشترک واقعی از مجموعه داده‌های آزمایشی نرم‌افزار ویستا، ب) و ج) به ترتیب طیف دامنه ردلرزه شماره ۱۵ و ۴۷ هستند و د) طیف f-k رکورد چشمه مشترک.



شکل ۵: (الف) رکورد چشمه مشترک واقعی نشان داده شده در شکل ۴- (الف) در حوزه ردلرزه شعاعی، باندهای (ب) تقریب، (ج) عمودی، (د) افقی و (ه) قطری حاصل از تبدیل موجک گسسته دو بعدی به کار گرفته شده در شکل ۵- (الف) و (و) رکورد چشمه مشترک واقعی نشان داده شده در شکل ۴- (الف) در حوزه ردلرزه شعاعی بعد از حذف باند عمودی تبدیل موجک گسسته دو بعدی.

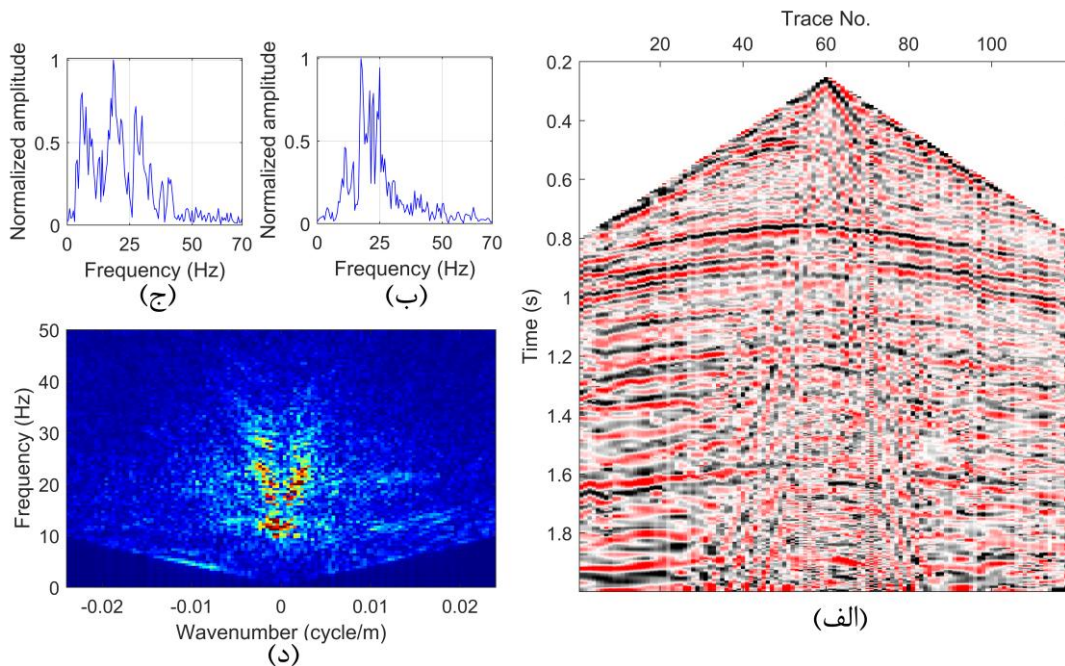


شکل ۶: (الف) رکورد چشمه مشترک واقعی نوفه‌زدا شده در شکل ۴ (الف) با استفاده از روش پیشنهادی، (ب) و (ج) به ترتیب طیف دامنه ردلرزه شماره ۱۵ و ۴۷ هستند و (د) طیف f-k رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده.

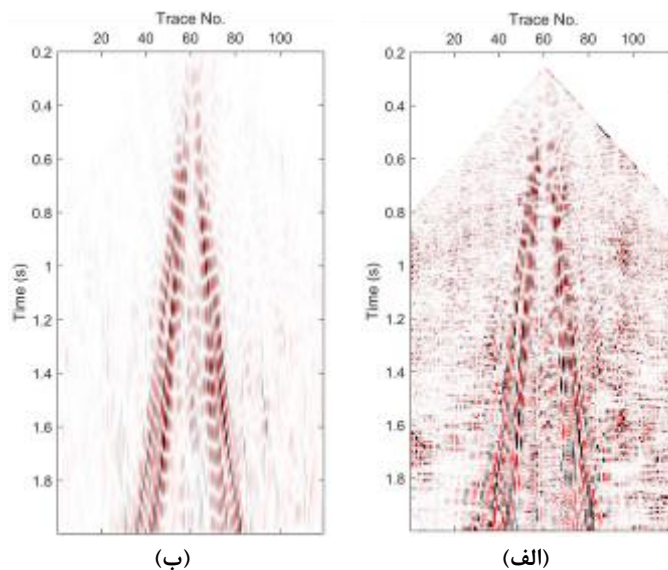
**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.**

نمود. به منظور ارزیابی بیشتر روش پیشنهادی و فیلتر  $f-k$ ، اختلاف رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده با رکورد چشمه مشترک اصلی مربوط به هر دو روش در شکل ۸ نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ۸-الف) و (ب) نشان می‌دهد؛ که تقریباً در هر دو روش بازتابنده‌های لرزه‌ای دست نخورده باقیمانده است. همچنین، روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به فیلتر  $f-k$  در تضعیف نوفه زمین‌گلت داشته و بیشتر نوفه هم‌دوس را تضعیف نموده است. به علاوه، روش تبدیل موجک شعاعی نوفه تصادفی را نیز تا حدی کاهش داده است.

به دلیل همپوشانی باند فرکانسی رویدادهای بازتابی و نوفه زمین‌گلت، طیف  $f-k$  به وضوح نمی‌تواند مرزهای سیگنال و نوفه را متمایز نماید. لذا انتخاب ناحیه تضعیف در روش فیلتر  $f-k$  دشوار و همراه با تضعیف سیگنال‌های بازتابی یا باقی ماندن بخشی از نوفه زمین‌گلت است. نتایج فیلتر  $f-k$  در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخشی از نوفه زمین‌گلت در خروجی فیلتر  $f-k$  باقی‌مانده است؛ که اعوجاجاتی را در رکورد چشمه مشترک ایجاد می‌کند و در طیف دامنه ردلرزه شماره ۴۷ و طیف  $f-k$  رکورد خروجی روش می‌توان اثرات نوفه زمین‌گلت باقیمانده را مشاهده



شکل ۷: الف) رکورد چشمه مشترک واقعی نوفه‌زدا شده در شکل ۴ الف) با استفاده از فیلتر  $f-k$ ، ب) و ج) به ترتیب طیف دامنه ردلرزه شماره ۱۵ و ۴۷ هستند و د) طیف  $f-k$  رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده.

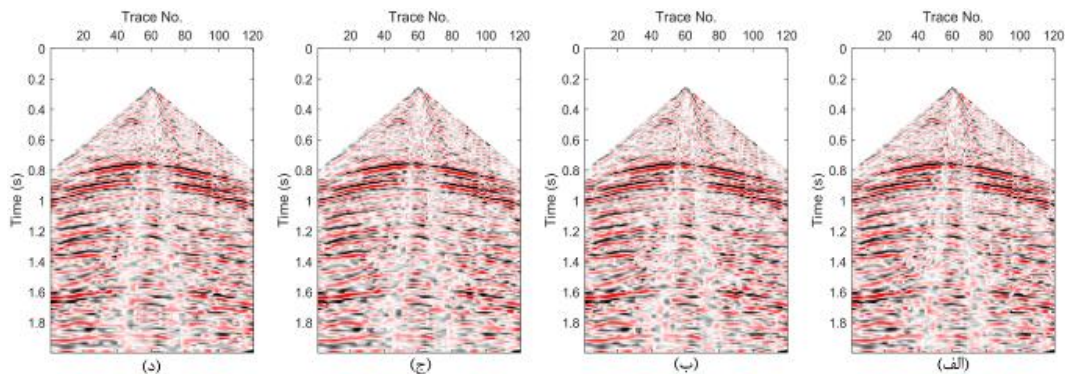


شکل ۸: اختلاف رکورد چشمه مشترک نوفه‌زدا شده با استفاده از الف) روش پیشنهادی، ب) فیلتر  $f-k$  با رکورد چشمه مشترک اصلی.

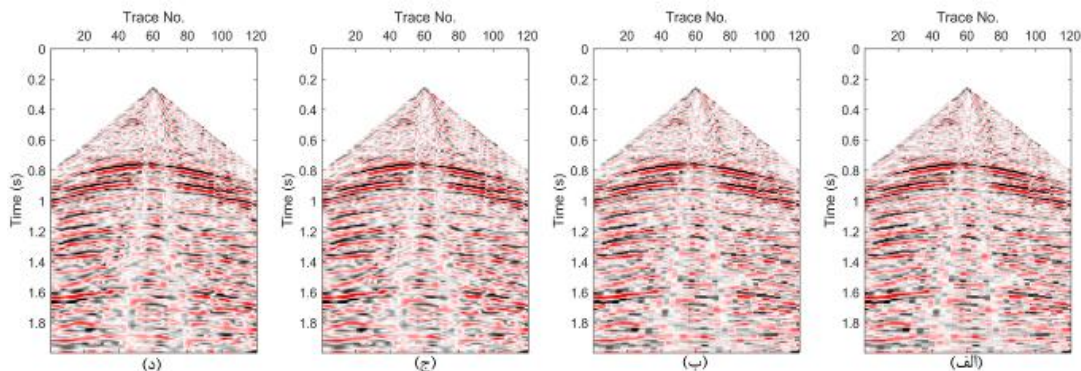
۴- بحث

مختصات  $t_0 = -0.1$  s تا حدودی نسبت به سایر مختصات‌ها عملکرد بهتری در تضعیف نوفه زمین‌غلت داشته است. پارامتر دیگری که می‌تواند بر روی نتایج و عملکرد الگوریتم تأثیرگذار باشد، نوع موجک مورد استفاده در محاسبه تبدیل موجک گسسته دو بعدی است. موجک‌های مادر زیادی می‌تواند برای انجام تبدیل موجک گسسته دوبعدی استفاده شوند؛ که هر کدام از آن‌ها ویژگی‌های متفاوتی دارند. در این مقاله چهار موجک مادر پرکاربرد  $haar$ ،  $sym10$ ،  $db5$  و  $coif5$  مورد بررسی قرار گرفتند؛ که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای ارزیابی تأثیر موجک مادر بر روی نتایج روش پیشنهادی در تضعیف نوفه زمین‌غلت، مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی به صورت  $x_0 = 0$  m و  $t_0 = -0.1$  s در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همانند مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی، نوع موجک مادر نیز تفاوت قابل توجهی در نتایج ایجاد نمی‌نماید؛ زیرا با تغییر موجک مادر، تغییری در باندهای فرکانسی فیلتر ایجاد نمی‌شود و فقط شکل تابع تبدیل فیلتر تغییرات اندکی دارد. البته می‌توان گفت که موجک مادر  $db5$  نسبت به سایر موجک‌ها، نوفه زمین‌غلت را اندکی بیشتر تضعیف نموده است.

مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی معمولاً در نزدیک یا در محل چشمه لرزه‌ای در حوزه دورافت-زمان‌سیر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که گفته شد، در مثال واقعی بیان شده، مبدأ تبدیل ردلرزه شعاعی در مختصات  $x_0 = 0$  m و  $t_0 = 0$  s در نظر گرفته شد. در ادامه، تأثیر مبدأ تبدیل ردلرزه شعاعی بر روی نتایج روش پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تقارن رکورد چشمه مشترک مختصات  $x_0 = 0$  m با  $x_0 = 0$  m انتخاب گردید و فقط مختصات  $t_0$  به صورت متغیر از میان مقادیر  $\{-0.1, -0.05, 0, 0.05\}$  انتخاب گردید. نتایج به ازای مقادیر مختلف مبدأ تبدیل ردلرزه شعاعی در شکل ۹ نشان داده شده است. برای تمام مقادیر مبدأ، موجک مادر مورد استفاده از نوع  $db5$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف قابل توجهی در نتایج مشاهده نمی‌شود و می‌توان گفت که مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی تأثیر چشم‌گیری در کارایی روش نخواهد داشت. دلیل عدم تغییر چشم‌گیر نتایج در این است که با تغییرات اندک در مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی، زاویه برخورد شعاع‌ها با رویدادهای مختلف چندان تغییری نمی‌کند؛ بنابراین تغییری در نحوه قرارگیری نوفه زمین‌غلت در مؤلفه قائم تبدیل موجک گسسته دوبعدی ایجاد نمی‌کند. با این وجود، مبدأ



شکل ۹: رکورد چشمه مشترک واقعی نوفه‌زدا شده نشان داده شده در شکل ۴- (الف) با استفاده از روش پیشنهادی برای مقادیر مختلف مختصات  $t_0 = -0.1$  s (د) و  $t_0 = -0.05$  s (ج)،  $t_0 = 0$  s (ب)،  $t_0 = 0.05$  s (الف).



شکل ۱۰: رکورد چشمه مشترک واقعی نوفه‌زدا شده نشان داده شده در شکل ۴- (الف) با استفاده از روش پیشنهادی برای موجک‌های مادر مختلف (الف)  $sym10$ ، (ب)  $haar$ ، (ج)  $coif5$  و (د)  $db5$ .



Bounds for the Two-Dimensional Discrete Wavelet Transform, Paper read at International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation.

Corso, G., Kuhn, P., Lucena, L. and Thomé, Z., 2003, Seismic Ground Roll Time-Frequency Filtering Using the Gaussian Wavelet Transform, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 318 (3), 551-561.

Deighan, A.J. and Watts, D.R., 1997, Ground-Roll Suppression Using the Wavelet Transform, *Geophysics*, 62 (6), 1896-1903.

Elboth, T., Vik Presterud, I. and Hermansen, D., 2010, Time-Frequency Seismic Data De-Noising, *Geophysical Prospecting*, 58 (3), 441-453.

Gadallah, M.R. and Fisher, R.L., 2005, *Applied Seismology: A Comprehensive Guide to Seismic Theory and Application*, PennWell Books.

Goudarzi, A. and Riahi, M.A., 2012, Seismic Coherent and Random Noise Attenuation Using the Undecimated Discrete Wavelet Transform Method with WDGA Technique, *Journal of Geophysics and Engineering*, 9 (6), 619.

Henley, D., 1999, The Radial Trace Transform: An Effective Domain for Coherent Noise Attenuation and Wavefield Separation, Paper read at 69<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.

Henley, D.C., 2003, Coherent Noise Attenuation in the Radial Trace Domain, *Geophysics*, 68 (4), 1408-1416.

Karsli, H. and Bayrak, Y., 2008, Ground-Roll Attenuation Based on Wiener Filtering and Benefits of Time-Frequency Imaging, *The Leading Edge*, 27 (2), 206-209.

Kendall, R., Jin, S., Ronen, S. and De Meersman, K., 2005, An SVD-Polarization Filter for Ground Roll Attenuation on Multicomponent Data. Paper read at EAGE/SEG Research Workshop-Multicomponent Seismic-Past, Present and Future.

Lima, R.R. and Porsani, M.J., 2015, Ground roll attenuation and improvement of velocity analysis using SVD filtering in the frequency domain and Lp deconvolution, Paper read at 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF.

Liu, Y. and Fomel, S., 2010, Local Time-Frequency Transform and Its Application to Ground-Roll Noise Attenuation, Paper read at 2010 SEG Annual Meeting.

Mallat, S., 2008, *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*, Academic press.

Mallat, S.G., 1989, A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation, *IEEE transactions on pattern analysis and machine*

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تقریباً جدید برای تضعیف نوفه زمین‌غلت بر اساس تبدیل موجک گسسته دو بعدی در حوزه ردلرزه شعاعی معرفی شد. بر اساس خواص ذاتی موج زمین‌غلت که دارای سرعت انتشار پایین، فرکانس کم و دامنه بالایی هستند، این امواج در مؤلفه قائم تبدیل موجک گسسته دو بعدی رکورد چشمه مشترک قرار می‌گیرند. به منظور این‌که تفکیک نوفه زمین‌غلت از امواج بازتابی توسط تبدیل موجک گسسته دو بعدی بهتر انجام شود، تبدیل موجک به جای اعمال بر روی رکورد چشمه مشترک بر روی تبدیل ردلرزه شعاعی آن انجام می‌شود؛ زیرا تبدیل ردلرزه شعاعی رویدادهای با شیب زیاد در حوزه دورافت-زمان سیر را در حوزه ردلرزه شعاعی با شیب بیشتر نشان می‌دهد و تفکیک نوفه زمین‌غلت از امواج بازتابی را ساده‌تر می‌کند. الگوریتم بر روی یک داده واقعی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با روش متداول فیلتر  $f-k$  مورد مقایسه قرار گرفت؛ که نشان داد روش پیشنهادی عملکرد بهتری داشته و نوفه زمین‌غلت بیشتری را تضعیف می‌نماید. همچنین، اثر دو عامل مبدأ مختصات تبدیل ردلرزه شعاعی و نوع موجک تبدیل موجک گسسته دو بعدی بر روی عملکرد الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت؛ که نتایج حاصل نشان داد که تغییر هر کدام از عوامل فوق تأثیر چشم‌گیری بر روی نتایج ندارد و الگوریتم نسبت به این دو عامل پایدار است. لذا می‌توان گفت که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین برای تضعیف نوفه زمین‌غلت در نظر گرفته شود؛ به خصوص هنگامی که نوفه مذکور از نظر باند فرکانسی با امواج بازتابی همپوشانی داشته باشد.

## ۶- منابع

Almeida, L.J., Manenti, R.R. and Porsani, M.J., 2015, Coherent Noise Attenuation Using the Wavelet Transform on Radial Basis, Paper read at 83<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts.

Askari, R. and Siahkoohi, H.R., 2008, Ground Roll Attenuation Using the S and X-F-K Transforms, *Geophysical Prospecting*, 56 (1), 105-114.

Boashash, B., 2015, *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*, Elsevier Science.

Brysk, H. and McCowan, D.W., 1986, A Slant-Stack Procedure for Point-Source Data, *Geophysics*, 51 (7), 1370-1386.

Chen, Y., Jiao, S., Ma, J., Chen, H., Zhou, Y. and Gan, S., 2015, Ground-Roll Noise Attenuation Using a Simple and Effective Approach Based on Local Band-Limited Orthogonalization, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12 (11), 2316-2320.

Cohen, J.K. and Chen, T., 1993, Quantitative Dip

- Yarham, C., Boeniger, U. and Herrmann, F., 2006, Curvelet-Based Ground Roll Removal, Paper read at 76<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Yarham, C. and Herrmann, F.J., 2008, Bayesian Ground-Roll Separation by Curvelet-Domain Sparsity Promotion, Paper read at 78<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Yilmaz, Ö., 2001, Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysicists.
- Zhu, W., Kelamis, P.G. and Liu, Q., 2004, Linear Noise Attenuation Using Local Radial Trace Median Filtering, The Leading Edge, 23 (8), 728-737.
- intelligence, 11 (7), 674-693.
- Porsani, M.J., Silva, M.G., Melo, P.E. and Ursin, B., 2010, SVD Filtering Applied to Ground-Roll Attenuation, Journal of Geophysics and Engineering, 7 (3), 284.
- Proakis, J.G. and Manolakis, D.G., 2007, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, 4 ed: Pearson Prentice Hall.
- Russell, B., Hampson, D. and Chun, J., 1990, Noise Elimination and the Radon Transform, Part 1, The Leading Edge, 9 (10), 18-23.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1995, Exploration Seismology, Cambridge University Press.



## Ground-roll noise attenuation by application of 2D discrete wavelet transform in radial trace domain

Hessam Hoseinnia<sup>1</sup>, Amin Roshandel Kahoo<sup>2\*</sup> and Behzad Tokhmchi<sup>3</sup>

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 15 December 2016; Accepted: 5 April 2017

Corresponding author: roshandel@shahroodut.ac.ir

### Keywords

2D Discrete Wavelet Transform  
Radial Trace Transform  
Ground-Roll Noise  
Coherent Noise Attenuation

### Extended Abstract

#### Summary

Reflection seismic data is often contaminated by a variety of coherent and incoherent noises that influence the reliability of the seismic data to provide a better understanding of the hydrocarbon reservoir characteristics. The ground-roll noise is characterized by dispersive wave, low frequency, high amplitude that propagates along and near the surface of the earth and will often obscures

the seismic reflection data. Removal of this type of noise is an essential part of land seismic data processing. Most of ground-roll noise removal or attenuation methods are based on transforms. Radial trace transform and wavelet transform are two of the most important and common transforms, which are used to attenuate ground-roll noise. Various methods have been introduced by different authors to attenuate the ground-roll noise. In this paper, we have used the wavelet transform on radial basis to attenuate the ground-roll noise. The method is based on the joint application of the two-dimensional discrete wavelet and radial transforms in order to eliminate the coherent noise, especially ground-roll noise. Since the radial trace transform reassign the linear events in the  $x$ - $t$  domain into vertical events in the  $r$ - $t$  domain, it provides a pleasant framework for two-dimensional (2D) discrete wavelet transform. The de-noised signal can be obtained by suppressing the vertical band of one-level, 2D discrete wavelet transform of the radial transformed seismic gather followed by transforming back the filtered radial-wavelet transform into the  $x$ - $t$  domain. To evaluate the efficiency of the proposed method to eliminate the ground-roll noise, we have tested the method on a real reflection seismic gather from an oilfield in southwest of Iran. We have also compared the obtained results with those from the  $f$  &  $k$  filtering for ground-roll noise suppression from seismic data. The results obtained from applying the proposed method on the real data test prove that the proposed method for ground-roll noise attenuation is as good as, or better than, those produced using  $f$  &  $k$  filtering.

### Introduction

Ground-roll noise is the main type of coherent seismic noise and is characterized by dispersive wave, low frequency, high amplitude relative to other events of interest in land seismic surveys that propagates along and near the surface of the earth and obscures useful information seismic exploration. There has been much research about eliminating ground-roll noise published in the literature, and many authors have introduced various methods for handling the ground-roll noise problem. A most straightforward and commonly used method for suppressing the ground-roll noise is band-pass filtering. In the case of the frequency overlap of primary reflections and ground-roll, the band-pass frequency filter either fail to attenuate all the ground-roll noise or remove much useful reflection energy. Dip filtering, also known as  $f$ - $k$  filtering, which is based on the 2D Fourier transform, is another commonly used technique to attenuate ground-roll noise. In 2D Fourier transform of a seismic prestack gather, there is no a clear separation border between signal and noise region, consequently it leads to signal distortion. Another widely used method to remove ground-roll noise from seismic data is singular value decomposition (SVD) based methods. Nevertheless, all of the above-mentioned approaches disagree with natural behavior of seismic data because of stationary seismic signal assumptions. Several methods have been introduced that consider the non-stationary nature for seismic data. The time-frequency de-noising algorithm is an effective method for handling noise problems. In this paper, we explain this method in detail, and analyze the influencing factors on the result of the method. Finally, the obtained results are compared with the results of the conventional  $f$ - $k$  method.

**Methodology and Approaches**

We used a method, introduced by Almeida et al. (2015) based on the joint application of the radial and wavelet transforms in order to attain effective ground-roll noise attenuation. Since the radial trace transform reassign the linear events in the x-t domain into vertical events in the r-t domain, it provides a pleasant framework for 2D discrete wavelet transform. At the first, we perform the forward radial transform to remap of the seismic common shot gather to ensure efficient event separation by the wavelet transform. Next, the one-level, 2D discrete wavelet transform is applied on the output of the first stage. Due to the described inherent property of the four sub-bands of the 2D discrete wavelet transform and ground-roll characteristics, the ground-roll noise will appear mainly in the vertical (HL) band. The de-noised signal can be obtained by suppressing the vertical band of one-level, 2D discrete wavelet transform and transform back the radial-wavelet transform into the x-t domain.

**Results and Conclusions**

The data set that we use to validate the efficiency of the proposed method is a common shot gather from demo data set of seismic data processing software VISTA. The obtained results show that, the proposed method is not sensitive to the type of mother wavelet and the geometric configuration of the origin of the radial trace transform. Hence, it can be an excellent alternative technique to ground-roll noise attenuation.

---