



## بهبود قدرت تفکیک قائم لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه

نیلوفر علایی<sup>۱</sup>، امین روشندل کاهو\*<sup>۲</sup> و ابوالقاسم کامکار روحانی<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: ۱۳۹۵/۰۳/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

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

### چکیده

### واژگان کلیدی

امروزه بهبود قدرت تفکیک داده‌های لرزه‌ای در مباحث اکتشاف منابع هیدروکربنی، به خصوص در ساختارهای پیچیده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. روش‌های زیادی برای این منظور معرفی شده‌اند که هر کدام دارای مزایا و معایب ناشی از فرضیات و تئوری حاکم بر مسئله هستند. در این مقاله، به منظور بهبود قدرت تفکیک قائم داده لرزه‌ای بازتابی از ویژگی مقیاس کردن زمانی سیگنال در حوزه تبدیل فوریه استفاده شده است. در این روش با استفاده از تبدیل فوریه موجه چشمه لرزه‌ای و نسخه مقیاس شده آن، فیلتری طراحی می‌شود که با اعمال آن بر روی داده لرزه‌ای، قدرت تفکیک قائم آن افزایش می‌یابد. کارایی این روش بر اساس نتایج حاصل از اعمال الگوریتم روش بر روی داده میدانی و مصنوعی برای بهبود قدرت تفکیک قائم داده‌های لرزه‌ای نشان داده شده است و می‌توان مشاهده نمود که فرکانس غالب داده بعد از اعمال الگوریتم مذکور نسبت به داده اولیه افزایش و پهنای محدوده فرکانسی آن گسترش یافته است. نتایج روش مورد استفاده با نتایج روش واهمامیخت فرکانسی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که روش تبدیل مقیاس نسبت به روش متداول واهمامیخت فرکانسی عملکرد بهتری دارد. البته لازم به ذکر است که بهبود قدرت تفکیک داده لرزه‌ای با استفاده از روش پیشنهادی باعث کاهش نسبت سیگنال به نوفه می‌شود و لذا باید میان میزان بهبود قدرت تفکیک و نسبت سیگنال به نوفه، حالت توازن برقرار نمود.

قدرت تفکیک قائم  
تبدیل فوریه  
فرکانس  
مقیاس کردن  
ضخامت هم‌کوکی

## ۱- مقدمه

فرکانسی به عنوان یک روش متداول مورد استفاده در صنعت مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- خاصیت مقیاس زمانی تبدیل فوریه

تبدیل فوریه یک سیگنال مانند  $x(t)$  مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود (بریقام، ۱۹۸۸).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt = |X(f)| e^{j\angle X(f)} \quad (2)$$

که  $f$  فرکانس،  $X(f)$  تبدیل فوریه سیگنال  $x(t)$ ،  $|X(f)|$  طیف دامنه و  $\angle X(f)$  طیف فاز سیگنال می‌باشند. چنانچه سیگنال  $x(t)$  با یک اسکالر  $a$  به صورت  $y(t) = x(at)$  مقیاس شود، خاصیت مقیاس زمانی برای تبدیل فوریه مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود (آنتونیو، ۲۰۰۶).

$$Y(f) = \text{Fourier Transform} \{x(at)\} = \frac{1}{|a|} X\left(\frac{f}{a}\right) \quad (3)$$

لذا مطابق رابطه (۳)، طیف دامنه و طیف فاز آن به صورت رابطه (۴) تغییر می‌کند.

$$|Y(f)| = \frac{1}{|a|} \left| X\left(\frac{f}{a}\right) \right| \quad (4)$$

$$\angle Y(f) = \angle X\left(\frac{f}{a}\right)$$

مطابق خاصیت مقیاس کردن زمانی سیگنال‌ها، چنانچه مقدار پارامتر مقیاس  $|a| > 1$  باشد، سیگنال  $y(t)$  نسخه فشرده شده سیگنال  $x(t)$  است و اگر پارامتر مقیاس  $|a| < 1$  باشد، سیگنال  $y(t)$  نسخه گسترش یافته سیگنال  $x(t)$  است (پروآکیس و مانولاکیس، ۲۰۰۷).

در شکل (الف-۱) و (ج-۱) دو موجک ریکر با فرکانس‌های غالب به ترتیب ۳۰ و ۶۰ هرتز نشان داده شده است که طیف دامنه آن‌ها نیز به ترتیب در شکل‌های (ب-۱) و (د-۱) نشان داده شده است. در شکل‌های (ه-۱) و (ز-۱) به ترتیب موجک مقیاس شده در حوزه زمان و حوزه فرکانس با پارامتر مقیاس  $a = 2$  نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو موجک مقیاس شده دقیقاً مشابه یکدیگر می‌باشند و این موضوع در طیف دامنه فرکانسی آن‌ها در شکل‌های (و-۱) و (ح-۱) نیز قابل مشاهده است. این نتیجه، درستی خاصیت مقیاس زمانی تبدیل فوریه (رابطه (۳)) را نشان می‌دهد. از طرفی مقایسه شکل زمانی و طیف دامنه فرکانسی موجک‌های مقیاس شده با موجک ریکر ۶۰ هرتز نشان می‌دهد که دو موجک مقیاس شده کاملاً با موجک ۶۰ هرتز یکسان می‌باشند؛ بنابراین مقیاس کردن (زمانی یا فرکانسی) موجک ریکر ۳۰ هرتز با پارامتر

ساختارهای زمین‌شناسی کوچک مقیاس نظیر لایه‌های نازک، یکی از اهداف جذاب اکتشافی در مطالعات لرزه‌نگاری هستند و شناسایی و آشکارسازی آن‌ها در اکتشافات لرزه‌ای حائز اهمیت است. از آنجایی که این ساختارها زیر حد تفکیک‌پذیری قائم لرزه‌ای (ضخامت هم‌کوکی): حداقل ضخامت است که در آن بازتاب از بالا و پایین لایه را می‌توان از یکدیگر تفکیک نمود و برابر یک چهارم طول موج در محل لایه هدف است (بدلی، ۱۹۸۵؛ هرون، ۲۰۱۱) هستند. لذا به منظور تشخیص این نوع مخازن به داده‌های لرزه‌ای با قدرت تفکیک‌پذیری بالا نیاز است (گائو و همکاران، ۲۰۰۹).

از آنجا که ضخامت هم‌کوکی با فرکانس غالب و سرعت بازه‌ای لایه هدف طبق رابطه (۱) در ارتباط است (هرون، ۲۰۱۱)، با افزایش فرکانس غالب داده‌های لرزه‌ای می‌توان مقدار ضخامت هم‌کوکی را کاهش و قدرت تفکیک قائم داده‌های لرزه‌ای را افزایش داد (ایلماز، ۲۰۰۱؛ شریف و جلدارت، ۱۹۹۵).

$$z = \frac{1}{4} \lambda = \frac{1}{4} \frac{V_{int}}{f_{dom}} \quad (1)$$

که  $z$  ضخامت هم‌کوکی،  $\lambda$  طول موج،  $f_{dom}$  فرکانس غالب داده‌ها و  $V_{int}$  سرعت بازه‌ای در لایه هدف است. (ایلماز، ۲۰۰۱). تاکنون روش‌های مختلفی برای بهبود قدرت تفکیک قائم داده‌های لرزه‌ای بازتابی معرفی شده‌اند. روش‌های مختلف واهمامیخت (رابینسون و تریتل، ۱۹۸۰) از جمله روش‌های متداول افزایش قدرت تفکیک قائم می‌باشند. در این روش‌ها بر اساس مدل هم‌میختی زمین، ردلرزه‌ی ثبت شده حاصل هم‌میخت سری بازتاب و موجک لرزه‌ای است. موجک لرزه‌ای، اغلب پهنای باند فرکانسی محدود دارد؛ در حالی که سری بازتاب دارای پهنای باند فرکانسی نامحدود است. از طریق فرایند واهمامیخت، موجک لرزه‌ای در حوزه زمان فشرده شده و بهبود قدرت تفکیک لرزه‌ای حاصل می‌شود. از آنجا که در این روش‌ها، فرضیاتی مبتنی بر مدل هم‌میختی داده‌های لرزه‌ای بازتابی در نظر گرفته شده است که غالباً با واقعیت تطابق کمی دارند، لذا محققان زیادی برای افزایش قدرت تفکیک قائم داده‌ها با استفاده از روش‌های نوین دیگری تلاش نمودند. از جمله روش‌های نوین افزایش قدرت تفکیک قائم می‌توان به روش‌هایی نظیر فیلتر معکوس Q (وانگ، ۲۰۰۶) و روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک پیوسته و گسسته (یو و همکاران، ۲۰۰۴؛ اسمیت و همکاران، ۲۰۰۸؛ گائو و همکاران، ۲۰۰۹؛ دوی و شوآب، ۲۰۰۹؛ راوات و دیال، ۲۰۱۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ کاسترو دی ماتوس و مارفورت، ۲۰۱۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۴؛ ساجید و گوش، ۲۰۱۴) اشاره نمود.

در این مقاله بر اساس خاصیت مقایسه کردن تبدیل فوریه، به کمک یک تئوری ساده و در عین حال کارآمد (چن و همکاران، ۲۰۱۴)، وضوح و قدرت تفکیک قائم داده‌های لرزه‌ای بازتابی سطحی افزایش داده می‌شود و نتایج آن با نتایج حاصل از روش واهمامیخت

که  $S(f)$ ،  $W(f)$  و  $R(f)$  به ترتیب تبدیل فوری ردلرزه، موجک چشمه لرزه‌ای و سری بازتاب زمین می‌باشند.

اگر در روابط (۵) و (۶)، مقیاس شده موجک چشمه لرزه‌ای  $\hat{w}(t)$  جایگزین موجک چشمه اولیه  $w(t)$  شود، می‌توان روابط (۷) و (۸) را به دست آورد.

$$\hat{s}(t) = \hat{w}(t) * r(t) \quad (7)$$

$$\hat{S}(f) = \hat{W}(f)R(f) \quad (8)$$

ارتباط میان دو ردلرزه  $s(t)$  و  $\hat{s}(t)$  در حوزه فرکانس به صورت رابطه (۹) است (چن و همکاران، ۲۰۱۴).

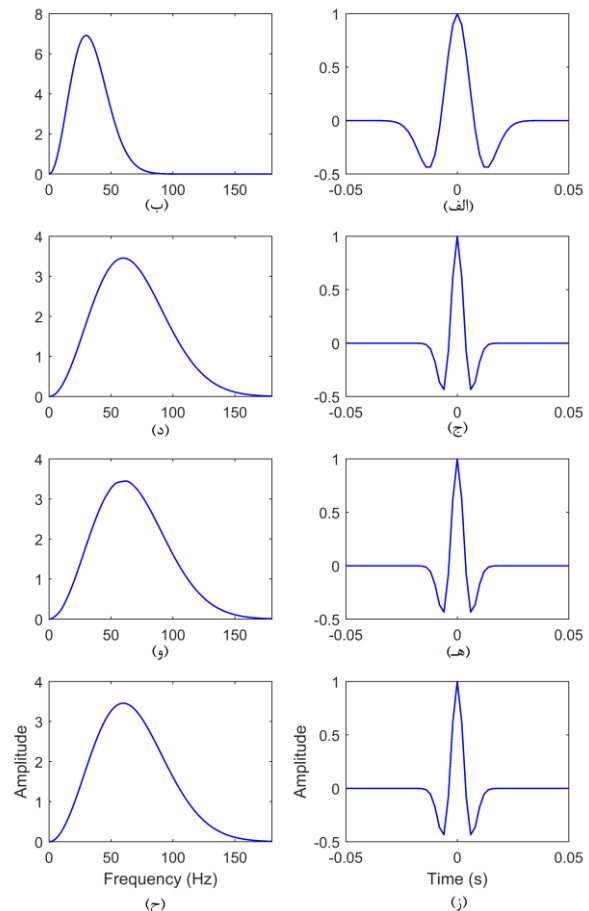
$$\hat{S}(f) = \frac{\hat{W}(f)}{W(f)} S(f) \quad (9)$$

عبارت  $H(f) = \hat{W}(f)/W(f)$  در واقع تابع تبدیل یک فیلتر است که با اعمال آن بر ردلرزه  $s(t)$  می‌توان ردلرزه با قدرت تفکیک بهبود یافته  $\hat{s}(t)$  را به دست آورد. لذا می‌توان فرایند بهبود قدرت تفکیک با تبدیل مقیاس را به صورت فلوجارت شکل ۲ نشان داد.

البته در انتخاب پارامتر مقیاس بایستی در نظر داشت که افزایش این پارامتر اگرچه باعث افزایش قدرت تفکیک می‌شود، ولی این فرایند همراه با افزایش یا تقویت نوفه نیز است؛ زیرا در این روش، فرکانس‌های بالا در طیف دامنه سیگنال تقویت می‌گردد و از آنجایی که نوفه‌های تصادفی در تمام فرکانس‌ها حضور دارند، تقویت فرکانس‌های بالا سبب می‌شود که نوفه‌های تصادفی تقویت شوند. لذا تعیین این پارامتر یک مسئله توازی است به این معنی که افزایش پارامتر مقیاس برابر با افزایش نوفه است. لذا باید در افزایش قدرت تفکیک و افزایش نوفه یک توازن برقرار باشد. البته می‌توان در طراحی فیلتر مقیاسی در رابطه (۹) با توجه به محتوای فرکانسی داده ورودی و بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین فرکانس مورد نظر در داده فیلتر شده، ضرایب فیلتر مقیاسی خارج از محدوده فرکانسی مورد نظر را به صورت تدریجی تضعیف نموده و به سمت مقدار صفر سوق داد. به این روش می‌توان از تقویت فرکانس‌های مربوط به نوفه تصادفی که در محدوده داده قرار ندارند، جلوگیری نمود. پارامتر مقیاس به صورت کیفی و سعی و خطا تعیین می‌شود. البته هر چه نسبت سیگنال به نوفه داده بالا باشد، می‌توان مقادیر بزرگ‌تر پارامتر مقیاس را انتخاب نمود. با این وجود مقدار پارامتر مقیاس در اغلب موارد بین ۱/۵ تا ۲ انتخاب می‌شود.

موجک چشمه لرزه‌ای را می‌توان به روش‌های مختلفی تخمین زد. در این مقاله، طیف دامنه موجک چشمه لرزه‌ای از طریق برازش منحنی به طیف دامنه ردلرزه تخمین زده می‌شود (دی و لاینز، ۱۹۹۸). سپس می‌توان طیف فاز را از طریق صفر قرار دادن برای موجک با فاز صفر و یا از روش کولموگروف برای موجک با فاز کمینه محاسبه نمود. در نهایت با استفاده از معکوس تبدیل فوری، می‌توان

مقیاس  $a = 2$ ، آن را به موجک ریکر ۶۰ هرتز تبدیل نموده است. لذا این ایده می‌تواند در افزایش قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۱: شکل زمانی و طیف دامنه فرکانسی (الف) و (ب) موجک ریکر با فرکانس غالب ۳۰ هرتز، (ج) و (د) موجک ریکر با فرکانس غالب ۶۰ هرتز، (ه) و (و) موجک ریکر ۳۰ هرتز مقیاس شده در حوزه زمان با پارامتر مقیاس  $a = 2$  و (ز) و (ح) موجک ریکر ۳۰ هرتز مقیاس شده در حوزه فرکانس با پارامتر مقیاس  $a = 2$ .

### ۳- روش شناسی الگوریتم

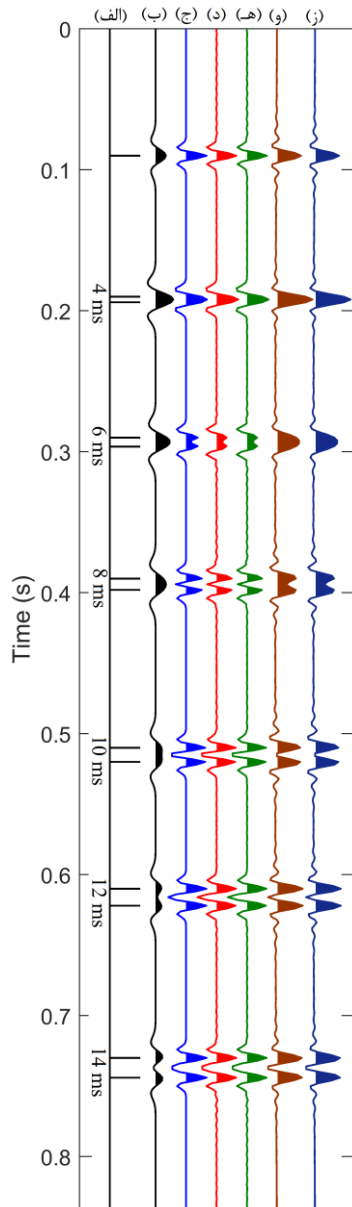
مطابق مدل هم‌میختی، ردلرزه  $s(t)$  در شرایط عدم حضور نوفه به صورت حاصل هم‌میخت موجک چشمه لرزه‌ای  $w(t)$  و سری بازتاب زمین  $r(t)$  مطابق رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱).

$$s(t) = w(t) * r(t) \quad (5)$$

که  $*$  عملگر هم‌میخت است. اگر از رابطه (۵) تبدیل فوری گرفته شود، مطابق خاصیت هم‌میختی تبدیل فوری (پرواکیس و مانولاکیس، ۲۰۰۷) عملگر هم‌میخت به عملگر ضرب مطابق رابطه (۶) تبدیل می‌شود.

$$S(f) = W(f)R(f) \quad (6)$$

علایی فرادنبه و همکاران، بهبود قدرت تفکیک قائم لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه، صفحات ۶۶-۵۷.

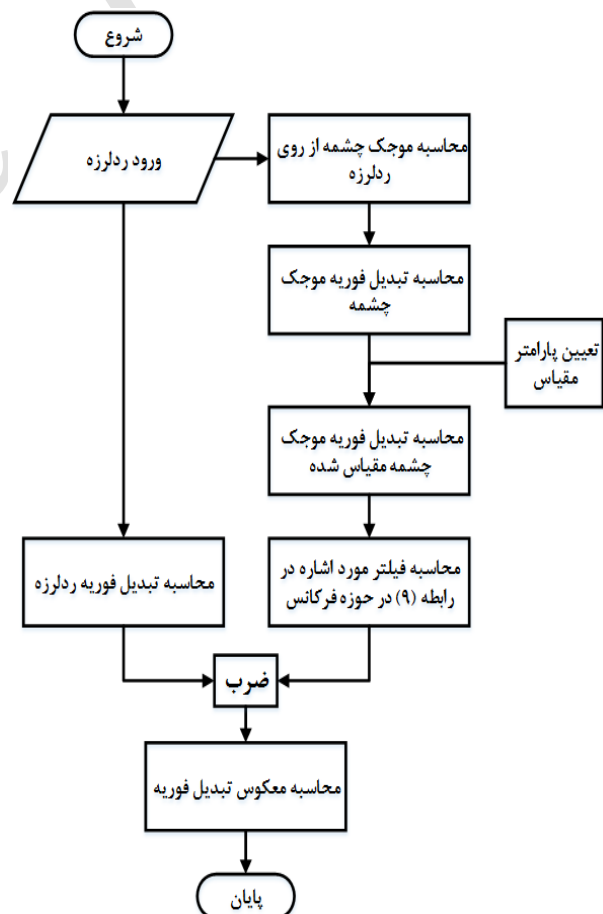


شکل ۳: مقایسه نتایج افزایش قدرت تفکیک زمانی ردلرزه با استفاده از دو روش مقیاس کردن و واهمامیخت فرکانسی. (الف) سری بازتاب مصنوعی زمین که شامل لایه‌های نازک با ضخامت‌های زمانی متفاوت است، ردلرزه‌های حاصل همامیخت موجک ریکر (ب) ۳۵ و (ج) ۷۰ هرتز با سری بازتاب (الف)، حاصل اعمال روش پیشنهادی بر روی ردلرزه حاصل از موجک ریکر ۳۵ هرتز با فرض (د) موجک معلوم و (ه) موجک نامعلوم و حاصل اعمال واهمامیخت فرکانسی با فرض (و) موجک معلوم و (ز) موجک نامعلوم.

ابتدا با فرض این‌که موجک تشکیل‌دهنده ردلرزه، معلوم باشد، دو روش فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی بر روی ردلرزه (ب) اعمال گردید که نتایج به ترتیب به صورت ردلرزه (د) و (و) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو روش قادر به تفکیک بازتاب از بالا و پایین لایه‌های نازک با ضخامت ۸ میلی‌ثانیه و

موجک چشمه لرزه‌ای را تخمین زد. در این مقاله برای تخمین موجک چشمه لرزه‌ای از برنامه رایانه‌ای wavelestimator.m در محیط MALAB موجود در مجموعه برنامه‌های CREWES استفاده شده است.

در شکل ۳، عملکرد الگوریتم ارائه شده در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی بر روی یک ردلرزه مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. سری بازتاب مصنوعی مورد استفاده در ساخت ردلرزه مصنوعی در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. سری بازتاب شامل ضرایب بازتاب مربوط به یک مرز مستقل و مرزهای بالا و پایین لایه‌های نازک با ضخامت‌های مختلف ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌ثانیه است. ردلرزه‌های شکل (۳-ب) و (۳-ج) به ترتیب حاصل همامیخت سری بازتاب شکل (۳-الف) با موجک‌های ریکر ۳۵ و ۷۰ هرتز است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ردلرزه حاصل از موجک ریکر ۳۵ هرتز، بازتاب از بالا و پایین لایه‌های نازک تا ضخامت زمانی ۱۲ میلی‌ثانیه قابل تفکیک از یکدیگر نمی‌باشند، در صورتی که در ردلرزه حاصل از موجک ریکر ۷۰ هرتز، فقط بازتاب از بالا و پایین لایه نازک با ضخامت زمانی ۴ میلی‌ثانیه غیرقابل تفکیک از یکدیگر می‌باشند.

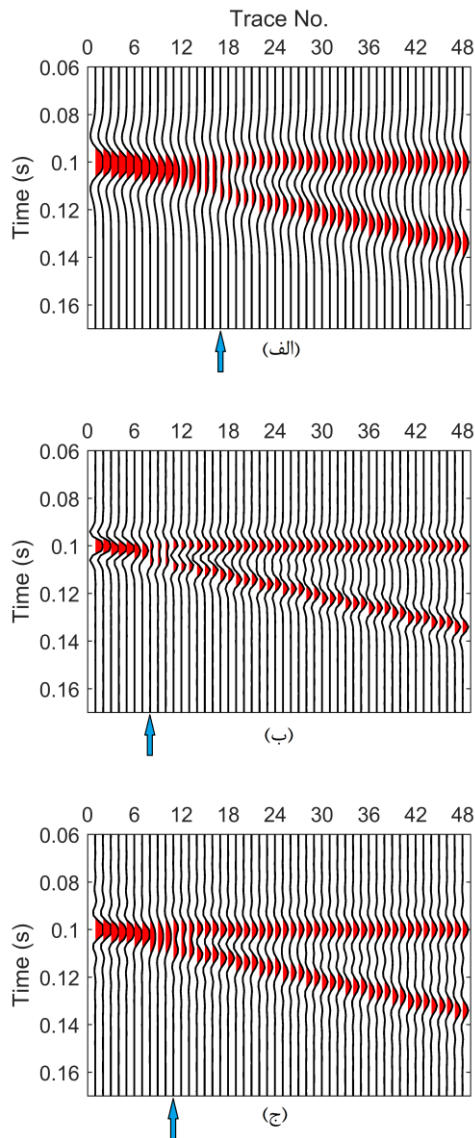


شکل ۲: فلوجارت روش افزایش قدرت تفکیک داده‌های لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس تبدیل فوریه.

### نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۲، شماره ۱، ۱۳۹۵.

بگیرد. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج واهمامیخت فرکانسی مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

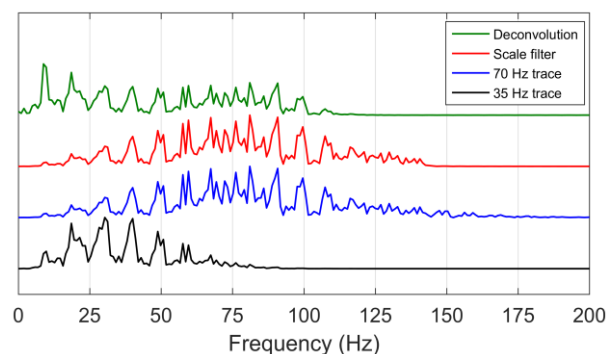
داده لرزه‌ای مصنوعی مورد بررسی، یک مقطع لرزه‌ای دوبعدی بدون حضور نوفه و شامل یک گوه است که در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. داده مصنوعی شامل ۴۸ ردلرزه به فاصله ۲۵ متری از یکدیگر است که دارای فرکانس غالب ۳۵ هرتز است و با گام ۲ میلی‌ثانیه نمونه‌برداری زمانی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ردلرزه شماره ۱۷ می‌توان بازتاب از بالا و پایین گوه را از یکدیگر تفکیک نمود.



شکل ۵: (الف) داده لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه، (ب) نتیجه اعمال فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲ و (ج) نتیجه اعمال واهمامیخت فرکانسی. در هر مورد، پیکان آبی رنگ محل تفکیک بازتاب از بالا و پایین گوه را نشان می‌دهد.

نتایج اعمال دور روش فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲ و واهمامیخت فرکانسی بر روی مقطع لرزه‌ای به ترتیب در شکل‌های

بالتر می‌باشند. هرچند که میزان بهبود قدرت تفکیک در روش فیلتر مقیاسی بهتر از روش واهمامیخت فرکانسی است. از طرفی در لایه نازک با ضخامت زمانی ۶ میلی‌ثانیه، روش واهمامیخت فرکانسی بر خلاف روش فیلتر مقیاسی نتوانسته است که بازتاب از بالا و پایین لایه نازک را تفکیک نماید. از مقایسه نتیجه روش فیلتر فرکانسی با ردلرزه (ج) می‌توان دریافت که روش مذکور ردلرزه با موجک ریکر ۳۵ هرتز را با دقت بسیار خوبی به ردلرزه با موجک ریکر ۷۰ هرتز تبدیل نموده است و قدرت تفکیک را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده است. در مرحله بعد، موجک مربوط به ردلرزه (ب) نامعلوم فرض گردید و از موجک تخمینی برای محاسبات استفاده گردید که نتایج مربوط به روش فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی به ترتیب به صورت ردلرزه‌های (ه) و (ز) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت ایجاد شده در نتایج بسیار ناچیز است و همچنان روش فیلتر فرکانسی از عملکرد بهتری در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی برخوردار است. در شکل ۴ طیف دامنه ردلرزه‌های شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پهنای محدوده فرکانسی و شکل طیف دامنه ردلرزه خروجی فیلتر مقیاسی بسیار به طیف دامنه ردلرزه حاصل از موجک ریکر ۷۰ هرتز شبیه است و به غیر از فرکانس‌های بالاتر از ۱۳۵ هرتز تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. در مقابل ردلرزه خروجی واهمامیخت فرکانسی هر چند نسبت به ردلرزه با موجک ریکر ۳۵ هرتز، افزایش پهنای محدوده فرکانسی دارد، اما تأکید آن بیشتر بر فرکانس‌های پایین است و برخلاف فیلتر مقیاسی، قله طیف دامنه را به سمت فرکانس‌های بالا چندان جابجا نمی‌کند. لذا با تحلیل طیف دامنه نتایج نیز می‌توان به عملکرد بهتر فیلتر مقیاسی در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی به منظور افزایش قدرت تفکیک زمانی پی برد.



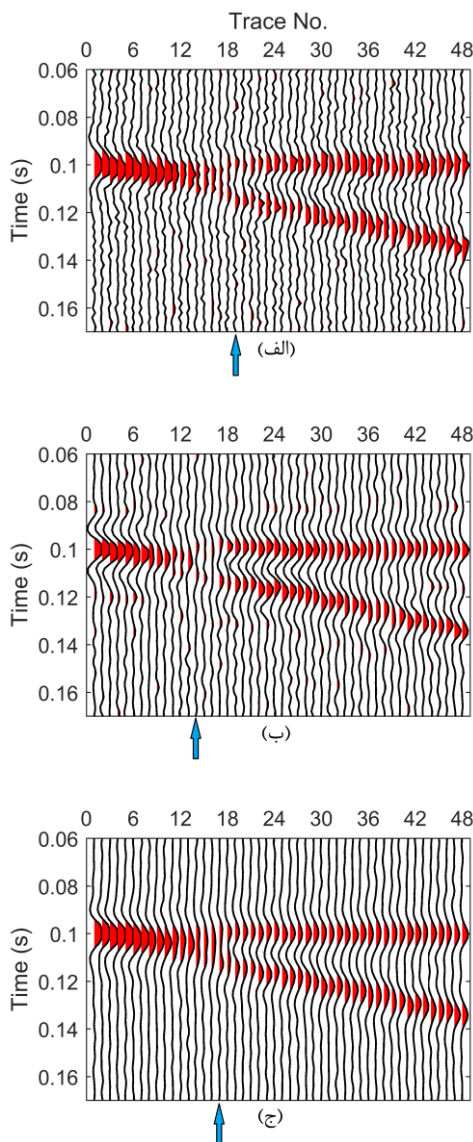
شکل ۴: طیف دامنه نرمال شده ردلرزه‌های (سیاه) با موجک ریکر ۳۵ هرتز، (آبی) با موجک ریکر ۷۰ هرتز، (قرمز) خروجی فیلتر مقیاسی و (سبز) خروجی واهمامیخت فرکانسی.

### ۴- کاربرد بر روی داده مصنوعی و میدانی

در ادامه کاربرد روش معرفی شده در مقاله بر روی داده لرزه‌ای مصنوعی و میدانی اعمال می‌گردد تا کارایی آن مورد بررسی قرار

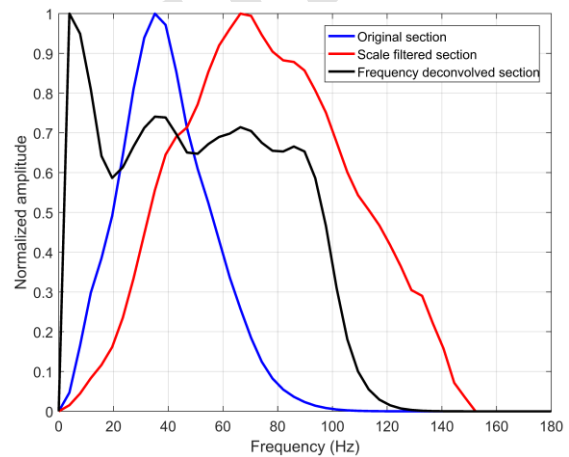
**علایی فرادنبه و همکاران، بهبود قدرت تفکیک قائم لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه، صفحات ۶۶-۵۷.**

حاکمی از عملکرد بهتر روش فیلتر مقیاسی در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی است. البته همان‌طور که دیده می‌شود، اعمال روش فیلتر مقیاسی کمی باعث افزایش دامنه نوفه‌هایی که همپوشانی فرکانسی با سیگنال اصلی دارند می‌شود؛ که چندان قابل توجه نیست. البته لازم به ذکر است که معمولاً فرایند افزایش قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای در مرحله پس از برنبارش و مهاجرت انجام می‌شود که مقدار زیادی از نوفه‌های تصادفی و ناهمدوس داده‌های لرزه‌ای در مراحل پردازشی قبلی تضعیف شده‌اند و داده ورودی این مرحله به نوفه تصادفی قابل توجهی آغشته نیست.



شکل ۷: (الف) داده لرزه‌ای مصنوعی آغشته به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۵ دسی‌بل، (ب) نتیجه اعمال فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲ و (ج) نتیجه اعمال واهمامیخت فرکانسی. در هر مورد، پیکان آبی رنگ محل تفکیک بازتاب از بالا و پایین گوه را نشان می‌دهد.

(۵-ب) و (۵-ج) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مرز تفکیک بازتاب از بالا و پایین گوه در ردلرزه‌های جلوتر از ردلرزه ۱۷ است که در مورد روش واهمامیخت فرکانسی در ردلرزه ۱۱ و در مورد روش فیلتر مقیاسی در ردلرزه شماره ۸ این اتفاق افتاده است. این واقعیت نشان می‌دهد که هر دو روش توانسته‌اند قدرت تفکیک زمانی داده‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهند و این افزایش قدرت تفکیک در روش فیلتر مقیاسی بسیار بیشتر از روش واهمامیخت فرکانسی است. در شکل ۶ طیف دامنه میانگین سه مقطع شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرکانس قله طیف دامنه میانگین مربوط به مقطع حاصل از اعمال فیلتر فرکانسی به نسبت به دو مقطع دیگر در فرکانس‌های بزرگ‌تر قرار دارد و محدوده فرکانسی آن بیشتر از دو مقطع دیگر از فرکانس‌های بزرگ‌تر تشکیل شده است؛ که خود تأییدی بر عملکرد بهتر آن در افزایش قدرت تفکیک زمانی داده لرزه‌ای است.

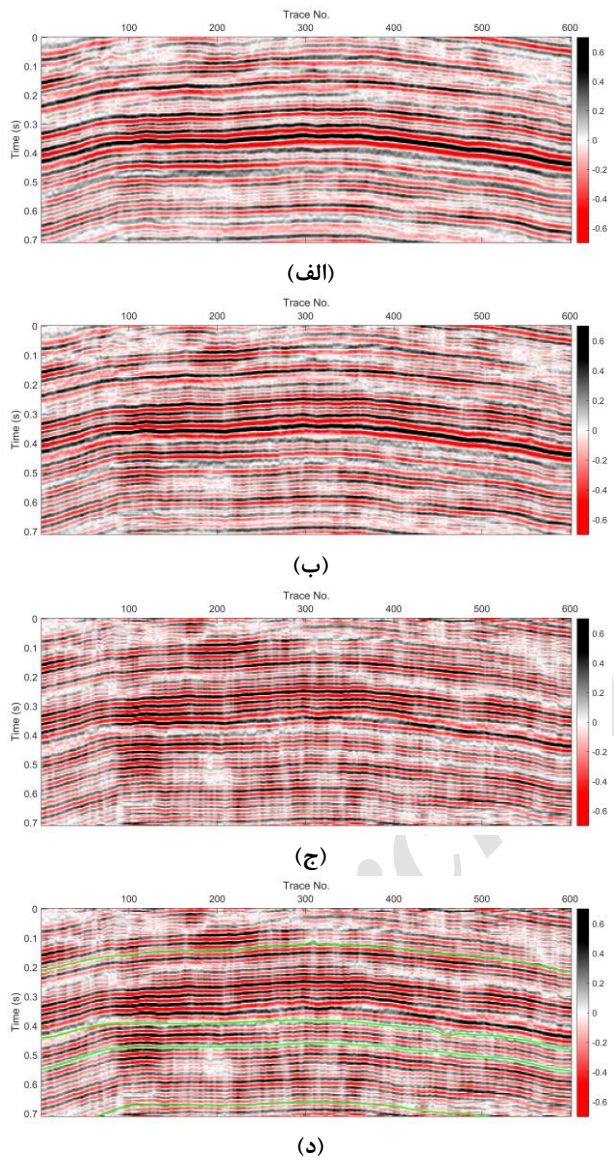


شکل ۶: طیف دامنه میانگین نرمال شده مقاطع لرزه‌ای (آبی) مقطع لرزه‌ای شکل (۵-الف)، (قرمز) مقطع لرزه‌ای شکل (۵-ب) و (سیاه) مقطع لرزه‌ای شکل (۵-ج).

در ادامه به منظور بررسی پایداری روش در مقابل نوفه، مقطع لرزه‌ای شکل (۵-الف) به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۵ دسی‌بل آغشته گردید که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود. نتایج اعمال دو روش فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی نیز به ترتیب در شکل‌های (۷-ب) و (۷-ج) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد دو روش فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی تحت تأثیر مخرب نوفه تصادفی قرار گرفته است. با این وجود همچنان روش فیلتر مقیاسی در افزایش قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای عملکرد بهتری در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی دارد. در روش فیلتر مقیاسی شماره ردلرزه‌ای که در آن بازتاب از بالا و پایین گوه قابل تفکیک باشد، از شماره ۱۹ در مقطع اولیه به شماره ۱۴ کاهش یافته است. در صورتی که شماره ردلرزه مذکور برای نتیجه واهمامیخت فرکانسی برابر ۱۷ است. این نتیجه

**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۲، شماره ۱، ۱۳۹۵.**

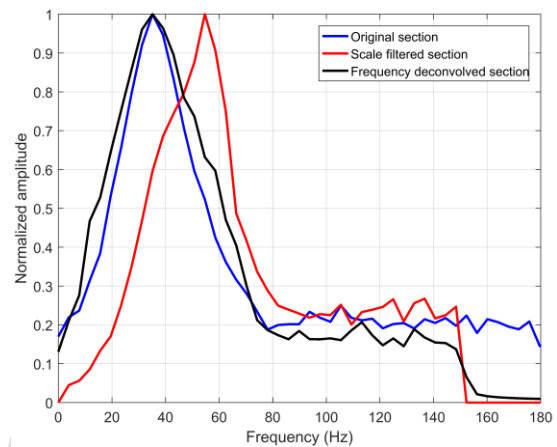
قبل و بعد از اعمال دو روش مذکور نشان داده شده است. در این شکل در هر کدام از بخش‌های بزرگنمایی شده، بازتاب‌های شاخصی که قبل از اعمال روش فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی، پنهان بوده و پس از اعمال آن‌ها نمایان گشته‌اند با پیکان‌های مختلفی نشان داده شده‌اند. نتایج به دست آمده کارآیی بهتر روش فیلتر مقیاسی را در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی به منظور افزایش قدرت تفکیک داده لرزه‌ای بازتابی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: (الف) داده لرزه‌ای میدانی، (ب) نتیجه اعمال فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲، (ج) نتیجه اعمال واهمامیخت فرکانسی و (د) نتیجه اعمال فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲ همراه با بازتابنده‌های تفکیک شده که با رنگ سبز نشان داده شده است.

به منظور مقایسه بیشتر نتایج و بررسی عملکرد دو روش در افزایش قدرت تفکیک زمانی، طیف دامنه میانگین مقطع لرزه‌ای قبل و بعد از اعمال الگوریتم محاسبه گردید که در شکل ۱۲ نشان داده

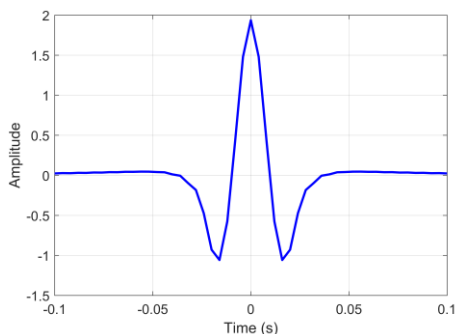
در شکل ۸ نیز مقایسه‌ای بر روی طیف دامنه میانگین مقاطع شکل ۷ صورت گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش فیلتر مقیاسی، قله فرکانسی را از حدود فرکانس ۳۵ هرتز به حدود فرکانس ۵۵ هرتز رسانده است که بیانگر افزایش قدرت تفکیک زمانی است. از طرفی در روش واهمامیخت فرکانسی، تغییری در قله فرکانسی طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که روش واهمامیخت فرکانسی در مقایسه با روش فیلتر مقیاسی در مقابل نوفه عملکرد چندان قابل قبولی ندارد و فقط مقدار بسیار کمی افزایش قدرت تفکیک زمانی را ایجاد می‌کند.



شکل ۸: طیف دامنه میانگین نرمال شده مقاطع لرزه‌ای (آبی)، مقطع لرزه‌ای شکل (۷-الف)، (قرمز) مقطع لرزه‌ای شکل (۷-ب) و (سیاه) مقطع لرزه‌ای شکل (۷-ج).

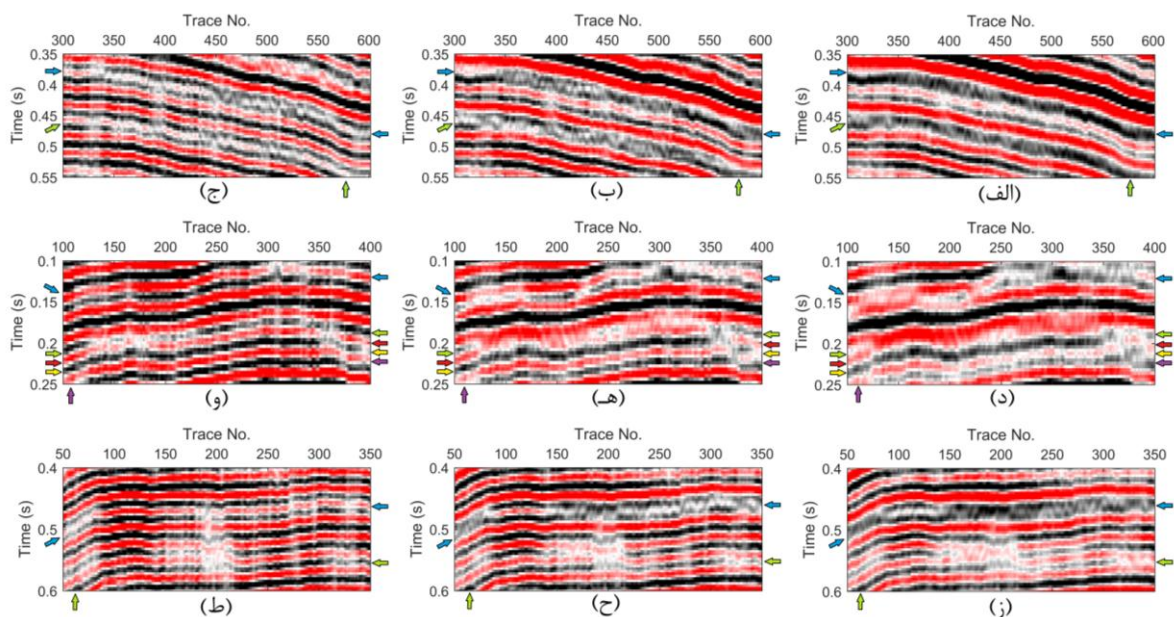
در ادامه کارآیی روش‌های فیلتر مقیاسی و واهمامیخت فرکانسی در افزایش قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای بازتابی میدانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. داده لرزه‌ای بازتابی میدانی مورد استفاده، یک مقطع قائم در راستای خط گیرنده از یک داده سه‌بعدی با ۴۰۰ خط چشمه و ۶۰۰ خط گیرنده است؛ که مربوط به یکی از میدان نفتی جنوب غرب ایران است و با گام ۴ میلی‌ثانیه نمونه‌برداری شده است. در شکل (۹-الف)، داده لرزه‌ای مورد استفاده نشان داده شده است. روش فیلتر مقیاسی با پارامتر مقیاس ۲ و واهمامیخت فرکانسی بر روی داده مورد نظر اعمال گردید که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های (۹-ب) و (۹-ج) نشان داده شده است. برای اعمال دو روش، موجک چشمه لرزه‌ای با استفاده از روش برازش منحنی به طیف دامنه ردلرزه تخمین زده شده است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در نگاه اول می‌توان مشاهده نمود که قدرت تفکیک زمانی داده لرزه‌ای با استفاده از دو روش مذکور افزایش یافته است و بازتاب‌های مربوط به لایه‌های نازک که در داده اولیه قابل مشاهده نبودند، آشکار شده‌اند. همچنین می‌توان به راحتی مشاهده نمود که میزان افزایش قدرت تفکیک زمانی در روش فیلتر مقیاسی بسیار چشمگیرتر از روش واهمامیخت فرکانسی است. به منظور مقایسه بهتر و دقیق‌تر نتایج، در شکل ۱۱، سه بخش بزرگنمایی شده

علایی فرادنبه و همکاران، بهبود قدرت تفکیک قائم لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه، صفحات ۶۶-۵۷.

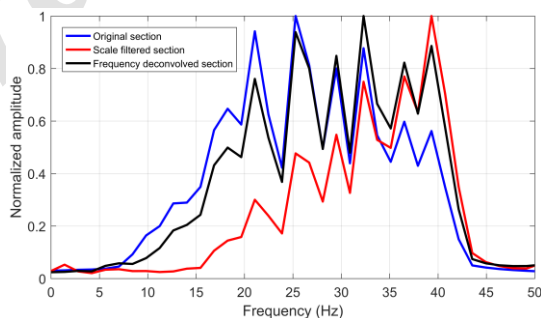


شکل ۱۰: موجک چشمه لرزه‌ای که به روش برازش منحنی به طیف دامنه ردلرزه تخمین زده شده است.

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در داده لرزه‌ای اولیه، فرکانس غالب در محدوده فرکانس پایین ۲۵ هرتز قرار دارد که در نتیجه حاصل از اعمال واهمامیخت فرکانسی به حدود فرکانس ۳۲ هرتز رسیده است؛ اما مقدار فرکانس غالب در نتیجه حاصل از اعمال فیلتر مقیاسی به حدود فرکانس ۴۰ هرتز رسیده است که نشان‌دهنده افزایش قدرت تفکیک زمانی بیشتر در روش فیلتر مقیاسی در مقایسه با روش واهمامیخت فرکانسی است.



شکل ۱۱: (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب داده لرزه‌ای اولیه، پس از اعمال واهمامیخت فرکانسی و فیلتر مقیاسی در پنجره اول. (د)، (ه) و (و) به ترتیب داده لرزه‌ای اولیه، پس از اعمال واهمامیخت فرکانسی و فیلتر مقیاسی در پنجره اول. (ز)، (ح) و (ط) به ترتیب داده لرزه‌ای اولیه، پس از اعمال واهمامیخت فرکانسی و فیلتر مقیاسی در پنجره اول.



شکل ۱۲: طیف دامنه میانگین نرمال شده مقاطع لرزه‌ای (آبی) مقطع لرزه‌ای شکل (۹-الف)، (قرمز) مقطع لرزه‌ای شکل (۹-ب) و (سیاه) مقطع لرزه‌ای شکل (۹-ج).

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

زمانی تبدیل فوریه، فیلتری طراحی می‌گردد که با اعمال آن بر روی ردلرزه سبب می‌شود که موجک با فرکانس غالب بالاتر جایگزین موجک ردلرزه گردد و از این طریق قدرت تفکیک زمانی ردلرزه

در این مقاله از یکی از خواص تبدیل فوریه تحت عنوان مقیاس کردن زمانی برای بهبود قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. در این روش با استفاده از خاصیت مقیاس کردن



Herron, D.A. and Latimer, R.B., 2011, First steps in seismic interpretation: Society of Exploration Geophysics.

Proakis, J. and Manolakis, D., 2007, Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, And Applications: Pearson Prentice Hall.

Rawat, A. and Dyal, S.S., 2010, Resolution enhancement of seismic data using stationary wavelet transform: 8th Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Extended Abstracts, 95P.

Robinson, E.A. and Treitel, S., 1980, Geophysical signal analysis: Prentice-Hall New Jersey.

Sajid, M. and Ghosh, D., 2014, Logarithm of short-time Fourier transform for extending the seismic bandwidth: Geophysical Prospecting, 62 (5), 1100-1110.

Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1995, Exploration Seismology: Cambridge University Press.

Smith, M., Perry, G., Stein, J., Bertrand, A. and Yu, G., 2008, Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform: first break, 26 (6), 97-102.

Wang, L., Gao, J., Zhao, W. and Jiang, X., 2012, Enhancing resolution of nonstationary seismic data by molecular-Gabor transform: Geophysics, 78 (1), V31-V41.

Wang, Y., 2006, Inverse Q-filter for seismic resolution enhancement: Geophysics, 71 (3), V51-V60.

Yilmaz, Ö., 2001, Seismic Data Analysis. Vol. 1: Society of Exploration Geophysicists.

Yu, Z., Dellinger, J., Gutowski, P. and Garossino, P., 2004, Seismic resolution enhancement in the wavelet-transform domain: 74th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 1933-1936.

Zhou, H., Wang, C., Marfurt, K.J., Jiang, Y. and Bi, J., 2014, Enhancing the Resolution of Seismic Data Using Improved Time-frequency Spectral Modeling: Presented at 84th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts

افزایش یابد. کارآیی روش مذکور هم در داده لرزه‌ای مصنوعی و هم در داده لرزه‌ای میدانی با روش متداول واهمامیخت فرکانسی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش فیلتر مقیاسی در افزایش قدرت تفکیک زمانی داده‌های لرزه‌ای بازتابی عملکرد بهتری دارد و موفقیت‌آمیزتر عمل می‌نماید. لذا این روش می‌تواند در آشکارسازی لایه‌های نازک مفید واقع شود.

با توجه به این که داده‌های لرزه‌ای بازتابی دارای خاصیت ناپایا می‌باشند، به عبارت دیگر محتوای فرکانسی آن‌ها با زمان در حال تغییر است، لذا می‌توان فیلتر طراحی شده در رابطه (۹) که از طیف دامنه موجک قبل و بعد از مقیاس کردن استفاده می‌نماید را در حوزه زمان-فرکانس طراحی نمود که خاصیت ناپایا بودن سیگنال لرزه‌ای را در نظر بگیرد.

## ۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله بدین وسیله از تیم تحقیقاتی CREWES که امکان استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای تهیه شده توسط ایشان را در اختیار عموم قرار داده‌اند، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## ۷- منابع

Badley, M.E., 1985, Practical seismic interpretation: International Human Resource Development Corporation.

Brigham, E.O., 1988, The fast Fourier transform and its applications: Prentice Hall.

Castro de Matos, M. and Marfurt, K., 2014, Complex Wavelet Transform Spectral Broadening: Presented at 84th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts.

Chen, S., Li, X-Y., Di, B. and Wei, J., 2014, A Novel Method for Enhancing Resolution Using Scale Transforms: 76th EAGE Conference & Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, Th P04-08.

Devi, K. and Schwab, H. 2009, High-resolution seismic signals from band-limited data using scaling laws of wavelet transforms: Geophysics, 74 (2), WA143-WA152.

Dey, A.K. and Lines, L.R., 1998, Seismic source wavelet estimation and the random reflectivity assumption: CREWES Research Report, 10, 21-21-28.

Gao, J.H., Wang, L.L. and Zhao, W., 2009, Enhancing resolution of seismic traces based on the changing wavelet model of seismograms: Chinese Journal



## Improvement of seismic vertical resolution using time scaling property of Fourier transform

Nilofar Alaei<sup>1</sup>, Amin Roshandel Kahoo<sup>2\*</sup> and Abolghasem Kamkar Rouhani<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: 21 May 2016; Accepted: 31 July 2016

Corresponding author: roshandel@shahroodut.ac.ir

### Keywords

Temporal Resolution  
Fourier Transform  
Time Scaling Property  
Frequency  
Tuning Thickness

### Extended Abstract

#### Summary

The improvement of seismic data resolution in hydrocarbon exploration, especially in complex structures is of great importance. There are two types of resolution in surface reflection seismic data: horizontal resolution and vertical resolution. Vertical or temporal resolution is expressed by means of the tuning thickness and horizontal or spatial resolution is expressed by means of the

Fresnel zone. Tuning thickness is defined as a quarter of the dominant wavelength at the position of the target layer. It is the minimum thickness by which the top and bottom of the layer is separable. The tuning thickness is related to interval velocity of the target layer and the dominant frequency of traveling wave at the depth of the target layer. Thus, the increase in the dominant frequency of seismic data can help to increase the vertical resolution.

### Introduction

Based on the convolution model, the seismic trace is a convolution of the earth reflectivity series with a seismic source wavelet. The seismic source wavelet is a frequency band-limited signal and the earth reflectivity series is assumed to be white noise, which is un-limited frequency bandwidth signal. Many methods have been introduced to enhance the vertical resolution of reflection seismic data. Each of them has advantages and disadvantages that are due to the assumptions and theories governing their issue. Inverse Q-filter, different deconvolution methods and time-variant spectral whitening are the basic methods of the resolution improvement. In the deconvolution procedure, the band limited seismic source signature is compressed by various methods to increase the frequency band of seismic source wavelet.

### Methodology and Approaches

In this paper, the vertical resolution of surface reflection seismic is increased using scaling property of Fourier transform. According to this property, when the value of scaling factor is selected greater than one, the scaled seismic trace in comparison with original seismic trace is compressed and its amplitude spectra are shifted to higher frequency band. In this way, the vertical resolution of seismic trace is increased. When the value of scaling factor is selected less than one, the scaled seismic trace compared to original seismic trace is extended and its amplitude spectra are shifted to lower frequency band, and thus, the vertical resolution of seismic trace is decreased. In this paper, a filter is designed based on Fourier transform of scaled and original source wavelet. Then, the filter is applied on seismic trace in frequency domain, and as a result, inverse Fourier transform of filtered signal is computed. The obtained signal is an improved resolution seismic trace.

### Results and Conclusions

The proposed algorithm has been tested on both synthetic and real seismic sections and the results have been compared to the frequency deconvolution method. The synthetic seismic section has been created from a wedge model by a 35 Hz Ricker wavelet. The enhanced resolution seismic section is obtained by applying the designed filter on the seismic traces. In the obtained section, the dominant frequency is shifted to 70 Hz and frequency bandwidth is expanded. Moreover, the tuning thickness after the filtering is reduced from 12.5 m to 6.25 m indicating that the vertical resolution is improved. In the real case, the dominant frequency is increased from 25 to 40 Hz. After filtering the seismic section as described above, we can see that the resolution is increased, and thin layers, which were not clear in the original section, become visible in the filtered seismic section. Therefore, the results of applying the proposed method on synthetic and field data show that we can efficiently obtain high resolution seismic section using the proposed method. Note that there is a trade-off between resolution and signal-to-noise (S/N) ratio in the time scaling transform of seismic trace. The S/N ratio is reduced a little after the filtering the trace.