آشکارسازی نواحی گازدار با استفاده ازروش تبدیل زمان- فرکانس محلی

عباسعلی مقدسی ■ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک دانشگاه [illegible]
خسرو تکاپویی ■ استاد دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی
شهرام مقدسی ■ بازرس کنترل کیفیت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، وزارت راه و شهرسازی

چکیده

محققین در عملیات اکتشاف ذخایر هیدروکربنی همواره با دنبال دستیابی به روش‌های جدید جهت آشکارسازی این ذخایر با دقت و قطعیت بیشتری بوده‌اند. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در راستای بررسی عملکرد روش‌های زمان-فرکانس به عنوان ابزاری جهت مطالعه‌ی مخازن هیدروکربنی انجام شده است. به علت ضعف روش تبدیل فوریه در توصیف محتوای فرکانسی سیگنال‌های ناپایا نظیر سیگنال‌های لرزه‌ای محلی، روش‌های متعدد زمان-فرکانس به کار گرفته شده‌اند. روش‌های زمان-فرکانس نظیر تبدیل فوریه زمان کوتاه، روش توزیع ویگنر-ویل، تبدیل موجک و دیگر روش‌ها هریک عملکرد راضی کننده‌ای را از خود نشان داده‌اند. حاصل کار، انتقال یک سیگنال از فضای یک بعدی زمان به صفحه دو بعدی زمان-فرکانس است که بعد اضافه شده، بعد فرکانس بوده و بیان می کند که در هر زمان چه مؤلفه فرکانسی و با چه دامنه‌ای وجود دارد. پس اگر یک مقطع لرزه‌ای در حوزه t-x وجود داشته باشد، نمایش زمان-فرکانس آن یک حجم سه‌بعدی خواهد بود که بعد سوم آن فرکانس است. در این مقاله با بیرون کشیدن مقاطع تک فرکانس، از این حجم در جهت تفسیر لرزه‌ای استفاده کرده‌ایم. روش زمان-فرکانسی که در این نوشتار استفاده شده، تبدیل زمان-فرکانس جدیدی است که کارایی خوبی در آشکارسازی نواحی گازی و هم‌چنین سایه‌های کم فرکانس دارد.

واژه‌های کلیدی تبدیل زمان-فرکانس محلی، سیگنال ناپایا، تفسیر لرزه‌ای، سایه کم فرکانس

مقدمه

رویدادهای زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی، اغلب تغییرات ناپایای بنیادی را از خود نشان می‌دهند. بنابراین، توصیف زمان-فرکانس سیگنال‌های لرزه‌ای برای تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی مفید است. هر یک از روش‌های زمان-فرکانس مزایا و معایب خاص خود را دارند. روش تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه (STFT) بیشترین کاربرد را در این زمینه داشته است، اگرچه تابع پنجره برای نمایش زمان-فرکانس STFT، تفکیک‌پذیری را محدود می کند[۱]. روش دیگر تبدیل‌های موجک است که با بسط بر حسب توابع موجک، سیگنال را هم در زمان و هم در فرکانس متمرکز می کنند [۳و۴]. اگرچه، به دلیل ساخت خانواده موجک توسط محدود کردن پارامتر فرکانس آن که باید به طور عکس متناسب با مقیاس باشد، ضرایب بسط در چارچوب موجک، تخمین نسبتاً دقیقی از محتوای فرکانسی شکل موج‌ها به خصوص در فرکانس‌های بالاتر ارائه نمی‌دهند[۵]. تبدیل S تعمیمی از تبدیل فوریه زمان کوتاه است که تبدیل موجک پیوسته را توسعه می‌دهد و بر بعضی از معایب آن غلبه می کند[۶]. پینگار و مانسینها با به‌کارگیری پنجره‌های با شکل متغیر و دلخواه، یک نسخه کلی از تبدیل S را توسعه دادند[۷]. وضوح تبدیل S نسبت به تابع توزیع ویگنر-وایل ضعیف‌تر است[۸]. توزیع ویگنر-وایل تفکیک‌پذیری بالائی ارائه می‌دهد، اما به خاطر نقائص شناخته شده‌اش نظیر جملات تداخلی و دگرنامی به ندرت استفاده می‌شود. روش تعقیب تطابق، رهیافتی دیگر برای نمایش زمان-فرکانس است[۵]. تعقیب تطابق، پارامترهای زیادی را در برمی گیرد و یک روش نسبتاً هزینه‌بر است. لیو و همکاران اخیراً یک روش جدید برای توصیف زمان-فرکانس سیگنال‌های ناپایای لرزه‌ای ارائه کرده‌اند که بر مبنای وارون‌سازی حداقل مربعات تنظیم‌یافته است. لیو و فومل، روش لیو و همکاران را با طراحی یک تبدیل زمان-فرکانس ناپایای وارون‌پذیر تحت عنوان تبدیل زمان-فرکانس محلی (Local Time Frequency, LTF) بسط داده‌اند. ایده کلیدی این است که خطای بین سیگنال ورودی و تمام مؤلفه‌های فوریه‌اش به‌طور همزمان با استفاده از رگرسیون ناپایای تنظیم‌یافته با کنترل روی تفکیک‌پذیری زمانی، حداقل شود. تبدیل LTF می‌تواند نمایش‌های زمان-فرکانس یا مکان- عدد موج محلی را برای پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای فراهم آورد.

۱- تئوری تبدیل زمان- فرکانس محلی

۱-۱- تبدیل زمان- فرکانس محلی (LTF)

سری فوریه توسط بسط یک تابع برحسب مجموعی از سینوس‌ها و کسینوس‌ها تعریف می‌شود. اگر سیگنال $f(x)$ در گستره تعریف شده باشد، سری فوریه سیگنال این گونه تعریف می‌شود:

$$f(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\cos(\frac{2\pi nx}{L})+b_n\sin(\frac{2\pi nx}{L})\right] \qquad (۱)$$

مفهوم سری فوریه را می‌توان به‌صورت بسط ضرایب مختلط این گونه تعریف کرد:

$$f(x)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}A_n\Psi_n(x) \qquad (۲)$$

که A_n ضرایب فوریه و $\Psi_n(x)=e^{i(2\pi nx/L)}$ است.

رگرسیون ناپایا، تغییرات ضرایب A_n را با (x) میسّر می‌سازد. در نمادسازی خطی، $A_n(x)$ را می‌توان با حل مسئله حداقل مربعات به‌دست آورد:

$$\min_{A_n}\left\|f(x)-\sum_n A_n(x)\Psi_n(x)\right\|_2^2 \qquad (۳)$$

مسئله حداقل‌سازی به خاطر تعداد زیاد متغیرهای مجهول نسبت به قیدها، بد حالت (□□□□□) است. راه حل آن است که قیدهای اضافی به شکل تنظیم وجود داشته باشند تا تغییرپذیری مجاز ضرایب تخمین زده شده را محدود سازد. تنظیم تیخونوف تابع هدف (□□□□□□□□□) را اینگونه اصلاح می‌کند:

$$\tilde{A}_n(x)=\arg\min_{A_n}\left\|f(x)-\sum_n A_n(x)\Psi_n(x)\right\|_2^2+\varepsilon^2\sum_n\left\|D[A_n(x)]\right\|_2^2 \qquad (۴)$$

که D عملگر تنظیم و ε پارامتر مقیاس‌دهی است.

نُرم ضرایب متغیر با زمان $|A_n(x)|$ نمایش زمان-فرکانس را تدارک می‌بیند و معادله ۲ تبدیل معکوس را ممکن می‌سازد. در شکل گسسته، گستره‌ی فرکانس‌ها توسط فرکانس نایکوئست یا توسط کاربر تعیین می‌شود. در یک رهیافت کمی متفاوت، لیو و همکاران خطای بین سیگنال ورودی و هر مؤلفه فرکانسی را به‌طور مستقل حداقل کردند. این روش تدارک دیدن تبدیل معکوس منجر به خطا می‌شود و مجموعه متفاوتی از کاربرد را دارد.

۲- تنظیم شکل‌دهنده

اگر داده‌های $f(x)$ با بردار d، پارامترهای مدل $A_n(x)$ با بردار m و رابطه تابعی آن‌ها یعنی $\sum\Psi_n(x)$ با عملگر مدل‌سازی پیشرو L نمایش داده شود، رهیافت بهینه‌سازی خطی منجر به حداقل کردن نُرم «حداقل مربعات تفاوت باقیمانده» یا $(Lm-d)$ می‌شود. به علاوه تنظیم تیخونوف در معادله‌ی ۴ نُرم Dm را حداقل می‌کند. بنابراین، در جستجوی مدلی از m هستیم که نُرم حداقل مربعات بردار ترکیبی $[Lm-d, Dm]^T$ را کمینه کند. حل قراردادی، شکل شناخته شده زیر را دربرمی‌گیرد؛

$$\hat{m}=(L^TL+\varepsilon^2D^TD)^{-1}L^Td \qquad (۵)$$

که در آن $\hat{m}$ دلالت بر تخمین حداقل مربعات m دارد و L^T به معنی عملگر الحاقی است. تنظیم شکل‌دهنده توسط بازشناخت نُرم کننده به عنوان یک عمل بنیادی، یک رهیافت دیگر را تدارک می‌بیند. وظیفه شکل‌دهنده آن است که مدلی از m را پیدا کند که بر داده‌های مشاهده شده منطبق بوده، اما به نوعی هموار نیز باشد. یک حل قراردادی برای مسئله تخمین که توسط شکل‌دهنده تنظیم یافته است، این گونه خواهد بود:

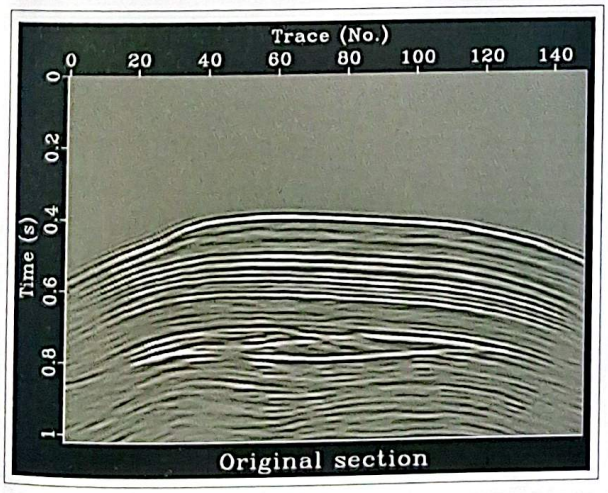
$$\hat{m}=\left[\lambda^2I+S(L^TL-\lambda^2I)\right]^{-1}SL^Td \qquad (۶)$$

که در آن S یک عملگر هموارکننده (شکل‌دهنده) است. پارامتر مقیاس دهنده λ در معادله‌ی ۶، مقیاس‌دهی نسبی عملگر پیش‌رو L را کنترل می‌کند، در حالی که شکل مدل برآوردی توسط عملگر شکل‌دهنده S کنترل می‌شود. در عمل می‌توان S را به عنوان یک هموارکننده گاوسی با شعاع قابل تنظیم تعریف کرد.

۳- پیاده‌سازی روش زمان-فرکانس محلی بر روی مقاطع لرزه‌ای حقیقی

۳-۱- اعمال روش بر داده‌های واقعی

با عبور سیگنال لرزه‌ای از میان مخازن گازی و در اثر پدیده جذب، مؤلفه‌های فرکانسی بالاتر موجود در سیگنال از پهنای باند سیگنال خارج شده و در نتیجه فرکانس غالب سیگنال نیز کاهش یافته که در نهایت منجر به کاهش محتوای فرکانسی سیگنال لرزه‌ای می‌شود. لذا برای تشخیص و ردیابی مخازن گازی باید به سمت مقاطع تک‌فرکانس پایین گرایش داشت. بنابراین روش تبدیل زمان-فرکانس محلی بر روی داده واقعی

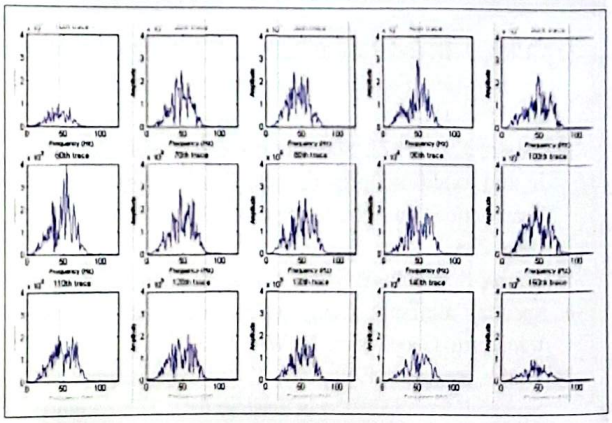


شکل ۱ | مقطع لرزه‌ای مربوط به یک مخزن گازی

اعمال گردید تا بررسی شود که این روش در تشخیص نواحی گازدار و سایه‌های کم فرکانس چگونه عمل می‌کند. هدف اصلی این است تا نحوه عملکرد این روش در آشکارسازی تغییراتی که در سیگنال لرزه‌ای در اثر عبور از نواحی گازدار ایجاد می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. در حقیقت شیوه‌ای که دراین مقاله برای آشکارسازی مخازن گازی به‌کار گرفته شده است، تهیه مقاطع تک‌فرکانس با فرکانس‌های کاهنده و پایش آنها برای پیدایش بی‌هنجاری‌های مورد نظر در مقاطع می‌باشد. محدوده فرکانسی مورد مطالعه بین ۱۰ تا ۶۰ هرتز و با فواصل ۵ هرتز در نظر گرفته شده است.

داده مورد مطالعه، یک مقطع لرزه‌ای به‌دست آمده از عملیات دریایی مربوط به اکتشاف یک مخزن گازی است. پوش مخزن یک بازتابنده شیب‌ساز کف دریاست. در شکل ۱ مقطع لرزه‌ای نمایش داده شده است. ناحیه مورد مطالعه دراین مخزن در محدوده زمانی بین ۰/۷ ثانیه تا ۰/۹ ثانیه قرار گرفته است. قبل از بررسی و تحلیل زمان-فرکانس، محتوای فرکانسی بعضی از تریس‌های مقطع با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) به‌دست آمدند که می‌توان آن را در شکل ۲ مشاهده کرد. می‌توان دید که در بعضی از تریس‌ها، فرکانس غالب تریس به سمت فرکانس‌های کمتر انتقال پیدا کرده است. در ادامه با بررسی و تحلیل زمان-فرکانس می‌بینیم که این تریس‌ها از جمله تریس‌هایی هستند که در محل مخزن بوده و از تضعیف فرکانسی ناشی از گاز تأثیر پذیرفته‌اند.

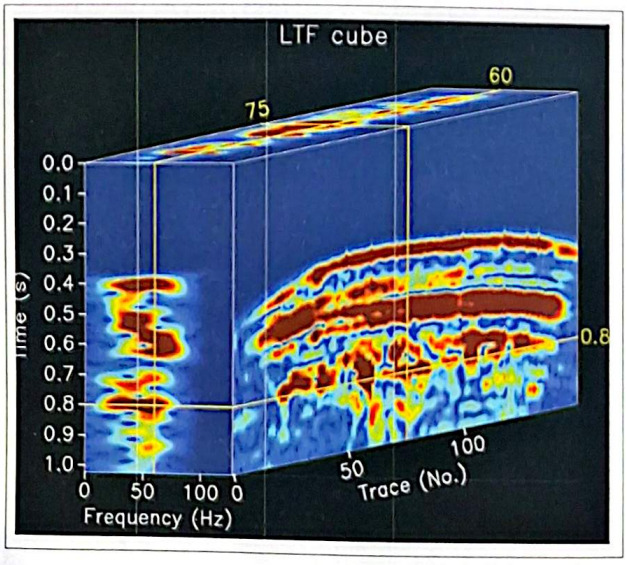
تحلیل زمان-فرکانس روی مقطع لرزه‌ای شکل ۱ اعمال گردیده است. در شکل ۳ مکعب زمان-مکان-فرکانس به‌دست آمده از تبدیل زمان فرکانس محلی نشان داده شده است. در این شکل خطوط زرد محل برش‌هایی را نشان می‌دهد که وجوه مشخص شده را می‌سازند. وجه بالایی، مقطع مکان- فرکانس در محل زمان ۰/۸ ثانیه، وجه بزرگ سمت راست مقطع زمان- مکان تک فرکانس ۰۶ هرتزی و وجه سمت چپ مقطع زمان - فرکانس مربوط به ردلرزه ۵۷م را نشان می‌دهند. با اعمال برش‌هایی بر روی محور فرکانس این مکعب می‌توان به مقاطع تک‌فرکانس دست یافت و برای تفسیر مقاطع لرزه‌ای از آنها بهره گرفت. مقاطع تک‌فرکانس منتخب به دست آمده از تبدیل زمان-فرکانس محلی در فرکانس‌های مختلف (۵۵ تا ۱۰ هرتز)، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲ | محتوای فرکانسی بعضی از ردلرزه‌های مقطع لرزه‌ای شکل ۱

با توجه به این شکل، ردلرزه‌هایی که در محل مخزن نیستند، فرکانس غالب را بین ۳۰ تا ۳۵هرتز و حداکثر ۴۰هرتز نشان می‌دهند. می‌توان گفت در غیاب مخزن گازی انتظار می‌رود که تمام ردلرزه‌های مقطع، این میزان از فرکانس غالب را نشان دهند. بنابراین مقاطع تک‌فرکانس ۳۰ و ۳۵هرتزی، فرکانس غالب مربوط به لایه‌بندی مقطع لرزه‌ای را نشان می‌دهند. اما در مقاطع تک فرکانس با فرکانس بالاتر از ۳۵هرتز آنومالی‌های پردامنه ای ظاهر شده‌اند که تفکیک لایه‌ها راضعیف کرده و به عبارتی لایه‌ها کاملاً مشخص نیستند. این پدیده را می‌توان این گونه تفسیر کرد که در آن نواحی پردامنه، لایه‌های نازکی وجود دارند.

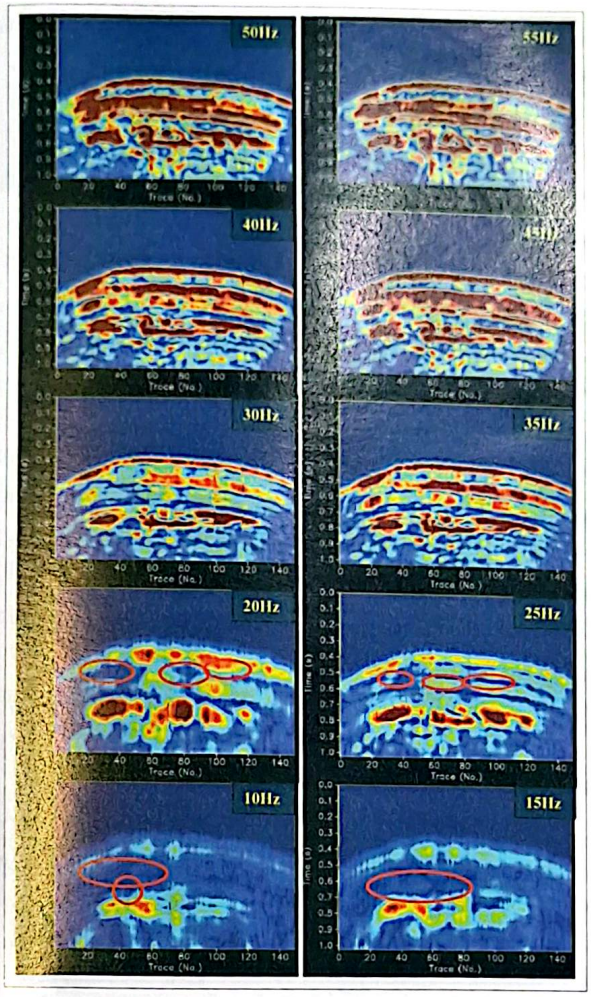
اما در مورد مقاطع تک‌فرکانس با فرکانس کمتر از ۳۰هرتز که دقیقاً مورد نظر این مطالعه است، می‌توان تفسیر را به این شکل بیان کرد که مخزن گازی در مکان زمانی بین ۰/۷ تا ۰/۹ثانیه و بین ردلرزه‌های ۲۰م تا ۱۳۰م قرار دارد. در مقطع تک‌فرکانس ۲۵هرتزی مشاهده می‌شود که آنومالی‌های پردامنه‌ای در این ناحیه قرار دارند که می‌تواند در اثر تضعیف انرژی لرزه‌ای و بنابراین تضعیف محتوای فرکانسی ردلرزه‌ها در آن ناحیه و در اثر وجود گاز در مخزن باشد. این نواحی با بیضی‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند. این آنومالی‌ها در مقطع تک‌فرکانس ۲۰ هرتزی نیز مشخص و البته قوی‌تر شده‌اند که می‌توان گفت فرکانس غالب ردلرزه‌های ناحیه‌ی مخزن از ۳۰هرتز (در غیاب مخزن) تا ۲۰هرتز کنونی کاهش یافته است. اما در مقطع تک‌فرکانس ۱۵هرتزی آنومالی‌ها کم شده‌اند و تنها در ناحیه بیضی قرمز رنگ این شکل، کماکان آنومالی نسبتاً قوی مانده است. برای این ناحیه این گونه می‌توان تفسیر نمود که انباشت گاز در ناحیه مورد نظر بیشتر از نواحی دیگر مخزن است که فرکانس غالب را نیز تا ۱۵هرتز کاهش داده است. اما در مقطع تک‌فرکانس ۱۰ هرتزی علاوه بر ناحیه بیضی قرمز رنگ



شکل ۳ | مکعب زمان-مکان- فرکانس به‌دست آمده در نتیجه اعمال تبدیل زمان- فرکانس محلی بر روی مقطع لرزه‌ای شکل ۱.

که کماکان وجود گاز را نشان می‌دهد، ناحیه‌ای نیز وجود دارد که می‌توان آن را به عنوان سـایه کم‌فرکانس تعبیر و تفسـیر کرد که در زیر ناحیه‌ای از مخزن قرار دارد که حاوی مقادیر زیادی گاز است. این ناحیه در شکل مقطع تک‌فرکانس ۱۵ هرتزی شکل ۴ نیز دیده می‌شود.

با توجه به موارد بررسی شده، مشاهده می‌شود که روش تبدیل زمان-فرکانس محلی می‌تواند به عنوان ابزار مفیدی برای آشکارسـازی مستقیم گاز در مخـازن و همین‌طـور سـایه‌های فرکانس پایین در تفسـیر مقاطع لرزه‌ای مورد اسـتفاده قرار گیرد. البته تحلیل به این صورت است که تمام مقاطـع تک‌فرکانس را مـورد پایش قرار دهیم تا تغییـرات بی‌هنجاری‌ها کاملاً محسـوس باشـند. در این مقاله نیز مطالعه به همیـن صورت انجام گرفته است.



شکل ۴ | مقاطع تک‌فرکانس به‌دست آمده در نتیجه اعمال تبدیل زمان-فرکانس محلی بر روی مقاطع لرزه‌ای در فرکانس‌های ۵۵ تا ۱۰ هرتز، خطوط قرمز رنگ نواحی حاوی گاز را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

۱- نشـانگرهایی کـه از تجزیـه‌ی زمان-فرکانس حاصل می‌شـوند، تفکیک‌پذیری بسـیار بهتری نسبت به نشـانگرهای حاصل از تبدیل فوریه دارند و ساختارهای زمین‌شناسی بیشتری را برای مفسرین پدیدار می‌سازند.

۲- با تشریح الگوریتم تبدیل زمان-فرکانس محلی و اعمال آن بر روی یک سـیگنال چیرپ دیده شد که این روش نه تنها طیف زمان-فرکانس را با تفکیک‌پذیری خوبی به‌دست می‌دهد، بلکه انعطاف‌پذیری خوبی نیز در تغییر تفکیک‌پذیری زمان-فرکانسی توسط تغییر شعاع یکنواخت‌کنندگی دارد. از این ویژگی می‌توان اسـتفاده نمود و بسته به کاربرد، شعاع را تغییر داد.

۳- تهیه مقاطع تک‌فرکانس با فرکانس‌های کاهنده و پایش آنها برای پیدایـش آنومالی‌ها در مقاطع می‌تواند به عنوان یک شـیوه مناسـب برای آشکارسازی نواحی گازدار و سایه‌های کم‌فرکانس به‌کار گرفته شود.

۴- همان‌طور که در مورد داده لرزه‌ای حقیقی بررسی شد، روش تبدیل زمان-فرکانس محلی به عنوان یک روش زمان-فرکانس جدید می‌تواند در تشخیص نواحی گازدار و مطالعه سایه‌های کم فرکانس به‌کار رود.

منـــابع

[1] Allen, J. B. and Rabinar, L. R., 1977, A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis: Proc. IEEE, 65, 1558-1564.

[2] Allen, J. B., 1977, Short term spectral analysis, synthetic and modification by discrete Fourier transform: IEEE Transactions on Acoustic, Speech, Signal Processing, 25, 235– 238.

[3] Sinha, S., Routh, P. S. and Anno, P., 2009, Instantaneous spectral attributes using scales in continuous-wavelet transform: Geophysics, 74, WA137–WA142.

[4] Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform: Geophysics, 70, P19–P25.

[5] Wang, Y., 2007, Seismic time-frequency spectral decomposition by matching pursuit: Geophysics, 72, V13–V20.

[6] Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R. P., 1996, Localization of the complex spectrum: the S transform: IEEE Transactions on Signal Processing, 44, 998–1001.

[7] Pinnegar, C. and Mansinha, L., 2003, The S-transform with windows of arbitrary and varying shape: Geophysics, 68, 381–385.

[8] Wigner, W., 1932, On the quantum correction for thermodynamic equilibrium: PhysicalReview, 40, 749–759.

[9] Liu, Y. and Fomel, S., 2010, Local time-frequency transform and its application to ground-roll noise attenuation: Annual Meeting, SEG, Denver, 3711–3716.

CamScanner