

## تبدیل S با تمرکز انرژی بیشینه و کاربرد آن برای آشکارسازی نواحی گازدار و سایه‌های کم-بسامد

محمدرداد<sup>۱\*</sup>، علی غلامی<sup>۲</sup> و حمیدرضا سیاه‌کوهی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری لرزه‌شناسی، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۳. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۸/۲۸، پذیرش نهایی: ۹۴/۳/۱۲)

### چکیده

انحراف استاندارد پنجره‌های گوسی مورد استفاده در تبدیل S برای هر مؤلفه بسامدی به صورت وارون بسامد تعریف می‌شود. در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد می‌شود که برای هر مؤلفه بسامدی، انحراف استاندارد پنجره گوسی مورد استفاده در تبدیل S به وسیله یک فرایند بهینه‌سازی و از طریق استفاده از یک معیار تمرکز انرژی به صورتی پیدا شود که نقشه زمان-بسامد حاصل، بیشترین تمرکز انرژی را داشته باشد. آزمایش روی یک سیگنال ناپایا، برتری عملکرد روش پیشنهادی را در مقایسه با روش‌های STFT و SST به لحاظ کیفی و کمی نشان می‌دهد. همچنین در این مقاله تعدادی نشانگر طیفی محلی از تحلیل زمان-بسامد مجموعه‌ای داده لرزه‌ای مربوط به یک مخزن گازی در ایران استخراج و از آن‌ها در آشکارسازی نواحی گازدار و سایه‌های کم-بسامد استفاده می‌شود. نشان داده می‌شود که نشانگرهای به‌دست‌آمده از روش زمان-بسامد پیشنهادی در این مقاله تفکیک‌پذیری و تمرکز انرژی بیشتری در مقایسه با نشانگرهای حاصل از تبدیل S دارند و بنابراین با روش پیشنهادی، تعبیر و تفسیر نواحی گازدار و سایه‌های کم-بسامد با دقت بیشتری انجام می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تبدیل S، تحلیل زمان-بسامد، تمرکز انرژی، مخزن گازی، نشانگر

### ۱. مقدمه

نشانگر لرزه‌ای، مقداری کمی از یک مشخصه لرزه‌ای مورد توجه است. از نشانگرهای لرزه‌ای در اکتشافات هیدروکربن و نیز مطالعه رخدادهای زمین‌شناسی نظیر گسل‌ها یا کانال‌ها در تحقیقات بسیاری استفاده شده است (چوپرا و مارفورت، ۲۰۰۵ و منابع داخل آن). در سال‌های اخیر استفاده از نشانگرهای زمان-بسامد از موضوعات مورد علاقه محققان بوده است (هررا و همکاران، ۲۰۱۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۱؛ وو و لیو، ۲۰۰۹؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاستاگنا و همکاران، ۲۰۰۳). بی‌گمان دقت تخمین و نتایج با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای زمان-بسامد تابع تفکیک‌پذیری روش تحلیل زمان-بسامد مورد استفاده است.

روش‌های نمایش زمان-بسامد (TFR) بسیاری وجود دارند. در میان آن‌ها می‌توان از تبدیل فوریه زمان-کوتاه (STFT) (گابور، ۱۹۴۶)، تبدیلات موجک (مالات، ۱۹۹۹)، تبدیل S (استاک‌ول و همکاران، ۱۹۹۶)، توزیع ویگنر-ویل (وو و لیو، ۲۰۰۹) و تبدیل هیلبرت-هوانگ (هررا و همکاران، ۲۰۱۴) نام برد. روش‌های بر مبنای فوریه، نظیر STFT و تبدیل S در الگوریتم خود از یک تابع پنجره استفاده می‌کنند که توسط آن سیگنال را قطعه‌بندی می‌کنند و از تبدیل فوریه قطعات سیگنال، یک طیف محلی در همسایگی مرکز پنجره تدارک می‌بینند. مقدار تفکیک‌پذیری تابعی از پنجره مورد استفاده و پهنای آن است. در روش STFT پهنای پنجره برای تمام سیگنال‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود، بنابراین تفکیک‌پذیری ایده‌آلی برای سیگنال‌های ناپایا نظیر سیگنال‌های لرزه‌ای حاصل نخواهد شد. بدین صورت که استفاده از یک پهنای پنجره کوچک تفکیک‌پذیری

میدان هیدروکربنی ایران استفاده می‌شود. به این ترتیب که از طریق تحلیل زمان- بسامد داده‌های لرزه‌ای، پنج نشانگر طیفی محلی دامنه لحظه‌ای، بسامد لحظه‌ای غالب، فاکتور شیرینی (sweetness factor)، مقاطع تک‌بسامد و نشانگر درصد دامنه نسبی تجمیعی (cumulative relative amplitude percentile) یا C80 استخراج و نتایج تفسیر می‌شوند. در این مورد هم مقایسه‌ای بین روش زمان- بسامد پیشنهادی و روش SST صورت می‌گیرد.

## ۲. روش پژوهش

نمایش سیگنال  $y(t)$  در حوزه زمان- بسامد از طریق یک روش نمایش زمان- بسامد بر مبنای فوریه عبارت است از:

$$TFR(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)w(t-\tau, \sigma)e^{i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

که در آن  $w(t-\tau, \sigma)$  تابع پنجره‌ای است که در لحظه زمانی  $\tau$  متمرکز شده و می‌تواند به صورت یک تابع گوسی تعریف شود که پهنای آن از طریق انحراف استاندارد  $\sigma$  تعیین می‌شود. نمایش زمان- بسامد از طریق تبدیل فوریه قطعات پنجره شده سیگنال و ارائه یک طیف محلی در همسایگی  $\tau$  به دست می‌آید. برای بازگشت پذیر بودن  $TFR$  و بازسازی کامل سیگنال در حوزه زمان، پنجره‌های استفاده شده باید شرط افزاز واحد  $\int_{-\infty}^{\infty} w(\tau, \sigma) d\tau = 1, \forall \sigma$  را رعایت کنند. بنابراین سیگنال  $y(t)$  از طریق رابطه (۲) بازیابی می‌شود:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} TFR(\tau, f) d\tau \right\} e^{-i2\pi ft} df. \quad (2)$$

در روش STFT،  $\sigma$  یک مقدار ثابت است؛ در حالی که در روش SST به صورت  $\sigma(f) = \frac{1}{|f|}$  به عنوان انحراف استاندارد یک تابع گوسی تعریف می‌شود. نمایش زمان- بسامد حاصل از SST عبارت است از:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{i2\pi ft} dt. \quad (3)$$

در مورد SST باید این نکته را متذکر شد که چون در

زمانی مناسبی ارائه می‌دهد، در حالی که تفکیک پذیری بسامدی ضعیف خواهد بود و برعکس، استفاده از پهنای پنجره بزرگ با وجود حصول تفکیک پذیری بسامدی مناسب، تفکیک پذیری زمانی ضعیفی به دست خواهد داد. تبدیل S که توسط استاکول و همکاران (۱۹۹۶) پیشنهاد شد، از یک پنجره با تابع گاوسی استفاده می‌کند که انحراف استاندارد آن رابطه عکس با بسامد سیگنال دارد. بدین ترتیب که برای بسامدهای بالا پنجره کوچک‌تر و برای بسامدهای پایین پنجره بزرگ‌تر استفاده می‌شود. با این حال با وجود بالا بودن تفکیک پذیری، تبدیل S در مقایسه با روش تبدیل فوریه زمان- کوتاه هنوز از حالت ایده آل دور است، چرا که در بسامدهای بالا تفکیک پذیری بسامدی بسیار تضعیف می‌شود و همین طور در بسامدهای پایین تفکیک پذیری زمانی ضعیف است. برای افزایش تفکیک پذیری تبدیل S، مک‌فادن و همکاران (۱۹۹۹) و پینگار و مانسینها (۲۰۰۳) استفاده از پنجره‌های غیر گاوسی و با هر شکل دلخواه و نیز وابسته بودن پهنای پنجره به پارامترهای بیشتری به جز انحراف استاندارد را پیشنهاد کردند.

یک فن دیگر برای افزایش تفکیک پذیری استفاده از معیارهای تمرکز انرژی برای انتخاب پنجره‌های مناسب است (غلامی، ۲۰۱۳؛ جورویچ و همکاران، ۲۰۰۸؛ استانکوویچ، ۲۰۰۱). در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد می‌شود که با آن مقدار بهینه پهنای پنجره گاوسی بر مبنای تئوری روش تبدیل S و از طریق بهینه‌سازی و استفاده از یک معیار تمرکز انرژی برای هر مؤلفه بسامدی پیدا می‌شود. در نهایت استفاده از پنجره‌های بهینه، یک تصویر زمان- بسامد با تمرکز انرژی زیاد ارائه می‌دهد. با پیاده‌سازی روش روی یک سیگنال مصنوعی و مقایسه کیفی و کمی با نتایج روش STFT و تبدیل S استاندارد (SST)، پیشنهاد شده توسط استاکول و همکاران (۱۹۹۶)، عملکرد روش پیشنهادی پژوهش حاضر ارزیابی می‌شود. همچنین از این روش در مطالعه تفسیری داده‌های لرزه‌ای یک مخزن گازی مربوط به یکی از

مورد SST در رابطه (۴) بیان شد. در این صورت شکل ماتریسی نمایش زمان-بسامد به این شکل خواهد بود:

$$\mathbf{TFR} = \mathbf{F}^{-1}[\hat{\mathbf{Y}} \odot \hat{\mathbf{W}}_{\sigma}], \quad (7)$$

که در آن،  $\hat{\mathbf{Y}}[k, l] = \hat{y}[k+l-1]$  از نسخه‌های شیفت داده‌شده تبدیل فوریه سیگنال ساخته شده است و  $\hat{\mathbf{W}}_{\sigma}[k, l] = \hat{w}_{\sigma}[k]$

## ۱.۲. بهینه‌سازی

همان طور که پیش‌تر بیان شد در نمایش‌های زمان-بسامد بر پایه فوریه، پنجره استفاده شده تعیین‌کننده مقدار تفکیک پذیری زمان-بسامدی است. از آنجا که یک تصویر زمان-بسامد با تمرکز انرژی و تفکیک پذیری بالا مطلوب است، بنابراین می‌توان از طریق بهینه‌سازی و با اعمال یک قید، که توسط آن بیشترین تمرکز انرژی در صفحه زمان-بسامد حاصل شود، پنجره‌ها را به صورت تطبیقی پیدا کرد. برای این منظور می‌توان از معیاری تحت عنوان معیار تمرکز انرژی (Energy Concentration Measure, ECM) بهره برد. تا کنون معیارهای تمرکز انرژی فراوانی معرفی شده‌اند که در هورلی و ریکارد (۲۰۰۹) به تعداد زیادی از آن‌ها پرداخته شده است. مسئله بهینه‌سازی را می‌توان طبق رابطه (۸) تعریف کرد:

$$\arg \min_{\text{window parameters}} \text{or } \arg \max \text{ ECM}(\mathbf{TFR}), \quad (8)$$

که در آن  $\mathbf{TFR}$  نمایش زمان-بسامد تولیدشده با روابط (۶) یا (۷) و  $\text{ECM}$  معیار تمرکز انرژی است. بسته به نوع معیار استفاده‌شده، جواب مطلوب از طریق کمینه‌سازی ( $\arg \min$ ) یا بیشینه‌سازی ( $\arg \max$ ) به دست می‌آید. جواب این مسئله پارامترهای بهینه پنجره‌ها برای لحظات زمانی (در رابطه با حصول نمایش زمان-بسامد توسط رابطه (۶)) یا مؤلفه‌های بسامدی (در رابطه با حصول نمایش زمان-بسامد توسط رابطه (۷)) است. در این مقاله پارامتر مورد نظر، انحراف استاندارد برای یک تابع گوسی است و بهینه‌سازی برای یافتن مقادیر انحراف استاندارد گوسی بهینه برای مؤلفه‌های بسامدی انجام

مورد سیگنال‌های ناپایا اطلاعاتی از محتوای طیفی سیگنال وجود ندارد، بنابراین باید این تبدیل در حوزه بسامد پیاده‌سازی شود (استاک‌ول، ۲۰۰۷):

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{y}(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{-i2\pi \alpha \tau} d\alpha, \quad (4)$$

که در آن  $\hat{y}(\alpha)$  بیانگر سیگنال در حوزه بسامد است. پهنای پنجره‌هایی که در SST استفاده می‌شوند، تنها تابعی از بسامد هستند و بنابراین انعطاف‌پذیری محدودی در پوشش دادن و قطعه‌بندی سیگنال در تحلیل زمان-بسامد دارند. برای افزایش انعطاف‌پذیری پهنای پنجره‌ها، تبدیل S تعمیم‌یافته (GST) توسط مک‌فادن و همکاران (۱۹۹۹) و بعد پینگار و مانسینا (۲۰۰۳) پیشنهاد شد که پهنای پنجره تابعی از یک مجموعه پارامتر  $p$  علاوه بر بسامد است و رابطه آن به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi p}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2p^2}} e^{i2\pi ft} dt. \quad (5)$$

ایده دیگر برای افزایش تفکیک‌پذیری زمان-بسامد حاصل از تبدیل S استفاده از معیارهای تمرکز انرژی است (ساهو و همکاران، ۲۰۰۹؛ جورویچ و همکاران، ۲۰۰۸). در همین زمینه در این مطالعه یک الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد می‌شود که از طریق آن برای هر لحظه زمانی یک پنجره بهینه پیدا می‌شود. اما در ابتدا و قبل از ارائه الگوریتم نیاز است که شکل گسسته ماتریسی یک  $TFR$  ارائه شود. برای یک سیگنال گسسته  $y(n) = y(nT)$  با بازه نمونه‌برداری  $T$  شکل ماتریسی رابطه (۱) عبارت خواهد بود از:

$$\mathbf{TFR} = \mathbf{F}[\mathbf{Y} \odot \mathbf{W}_{\sigma}], \quad (6)$$

که در آن،  $\mathbf{Y}[n, m] = y[n]$  و  $\mathbf{W}_{\sigma}[n, m] = w_{\sigma}[n+m-1]$  و  $\mathbf{F}$  ماتریس تبدیل فوریه گسسته (DFT) است.  $\mathbf{TFR}$  ماتریس توزیع سیگنال در حوزه زمان-بسامد است.  $m$  امین ستون این ماتریس توزیع طیفی سیگنال حول  $m$  امین نمونه زمانی سیگنال است. علامت  $\odot$  به معنای ضرب نمونه در نمونه دو ماتریس است. قابل ذکر است که نمایش زمان-بسامد بر پایه فوریه یک سیگنال را می‌توان از تبدیل فوریه سیگنال نیز به دست آورد؛ همان طور که در

بسامدی طیف سیگنال در نمایش زمان-بسامد به دست آمده را اندازه گیری می کند. هرچه مقدار ECM کوچک تر باشد تمرکز انرژی بیشتر خواهد بود.

### ۳. اعمال روش بر داده های مصنوعی و حقیقی

#### ۳.۱. نمایش زمان-بسامد سیگنال مصنوعی

در این بخش عملکرد روش نمایش زمان-بسامد پیشنهادی روی یک سیگنال مصنوعی بررسی می شود و به لحاظ کیفی و کمی مقایسه ای با عملکرد روش های STFT و SST انجام می گیرد. شکل های ۱-الف تا ۱-و به ترتیب یک سیگنال مصنوعی ناپایا، طیف دامنه، نمایش زمان-بسامد مطلوب و تخمین های نمایش زمان-بسامد آن را که توسط STFT، SST و روش پیشنهادی به دست آمده است، نشان می دهد. طول پنجره مورد استفاده در روش STFT توسط رابطه پیشنهادی بواساش (۱۹۹۱)، یعنی  $\sqrt{\frac{2T}{B}}$ ، به دست آمده است که در این رابطه  $T$  طول زمانی سیگنال و  $B$  پهنای باند سیگنال است. همان طور که در شکل دیده می شود، روش پیشنهادی به لحاظ کیفی تصویر زمان-بسامد با تمرکز انرژی و تفکیک پذیری بالاتری در مقایسه با دو روش دیگر ارائه کرده است.

جدول ۱. الگوریتم بهینه سازی روش پیشنهادی نمایش

زمان-بسامد از طریق رابطه (۷).

```

Initialize :
choose a set of  $N_{\Pi}$  possible standard deviations  $\sigma_i \in [\sigma_1, \dots, \sigma_{N_{\Pi}}]$ ;
construct data matrix  $\hat{Y}_{N \times N}$  using  $\hat{y}_{N \times 1}$  as its columns;
For  $i = 1 : N_{\Pi}$ 
    construct  $\hat{W}_{N \times N}$  using a gaussian window of standard deviation  $\sigma_i$ 
     $\mathbf{TFR} = \mathbf{F}^{-1}[\hat{Y} \odot \hat{W}_{\sigma_i}]$ 
    For  $j = 1 : N$ 
         $\mathbf{V}_{N_{\Pi} \times N}(i, j) = \text{ECM}(\mathbf{TFR}(:, j))$ 
    end
end
 $\gamma_{1:N} = \min \text{ or } \max[\mathbf{V}_{N_{\Pi} \times N}]$ 
 $\hat{W}_{opt} = \hat{W}_{\sigma_{\gamma}}$ 
 $\mathbf{TFR}_{opt} = \mathbf{F}^{-1}[\hat{Y} \odot \hat{W}_{opt}]$ 

```

می گیرد که از طریق رابطه (۷) بتوان به نمایش زمان-بسامد با تمرکز انرژی بیشینه دست یافت. جدول ۱ فرایند به دست آوردن روش نمایش زمان-بسامد پیشنهادی را نشان می دهد. قابل ذکر است که می توان الگوریتم مشابهی برای به دست آوردن نمایش زمان-بسامد با تمرکز انرژی بیشینه از طریق رابطه (۶) نیز تعریف کرد که در آن صورت هدف از بهینه سازی یافتن مقادیر انحراف استاندارد بهینه برای هر یک از نمونه های زمانی خواهد بود. در جدول ۱،  $N_{\Pi}$  تعداد مقادیر انحراف استاندارد در جدول ۱،  $\sigma_i \in [\sigma_1, \dots, \sigma_{N_{\Pi}}]$  وقتی  $N_{\Pi}$  بزرگ باشد، فرایند بهینه سازی زمان بر خواهد شد؛ بنابراین برای افزایش کارایی روش، از شیوه پیشنهادی جونز و بارانیوک (۱۹۹۴) استفاده می شود؛ به این ترتیب که ماتریس  $V$  را به صورت درشت نمونه برداری می کنیم و بعد از طریق یک روش درونیابی مثل درونیابی cubic spline مقادیر  $V$  را در نمونه های ریزتر پیدا می کنیم. نهایتاً بهینه سازی (مینیمم سازی یا ماکزیمم سازی) را در امتداد  $\sigma$  اعمال کرده و بعد با اعمال یک فیلتر متحرک میانگین منحنی  $\sigma_{\gamma}$  رانرم می کنیم. بردار  $\sigma_{\gamma}$  حاصل، در بردارنده مقادیر انحراف استاندارد بهینه خواهد بود که پنجره های بهینه را به دست خواهد داد و در نتیجه نمایش زمان-بسامد با تمرکز انرژی بیشینه با استفاده از پنجره های بهینه به دست خواهد آمد.

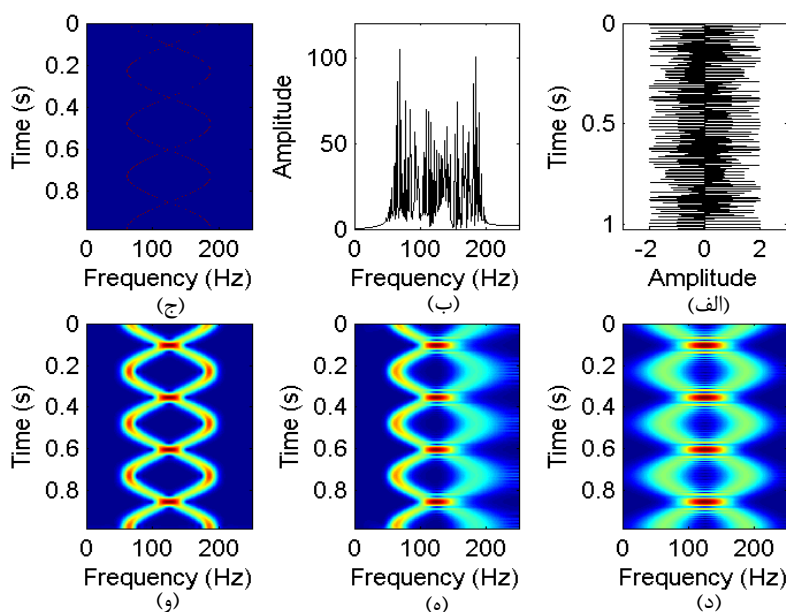
معیار تمرکز انرژی (ECM) مورد استفاده در این

مقاله بی نظمی شانون اصلاح شده (Modified Shannon Entropy)

است که به این صورت تعریف می شود (هورلی و ریکارد، ۲۰۰۹):

$$ECM = - \sum_{k=1}^N \frac{\mathbf{TFR}(k, j)}{\sum_{k=1}^N \mathbf{TFR}(k, j)} \log \left( \frac{\mathbf{TFR}(k, j)}{\sum_{k=1}^N \mathbf{TFR}(k, j)} + \varepsilon \right), \quad (9)$$

که  $\varepsilon$  مقدار مثبت کوچکی است که از صفر شدن آرگومان تابع لگاریتم جلوگیری می کند. در این رابطه تابع ECM تمرکز انرژی توزیع زمانی [آمین نمونه]



شکل ۱. (الف) یک سیگنال ناپایا، (ب) طیف دامنه آن و (ج) نمایش مطلوب آن در صفحه زمان-بسامد. تخمین‌های نمایش سیگنال در حوزه زمان-بسامد توسط (د) STFT، (ه) SST و (و) روش پیشنهادی نشان داده شده است.

$$\rho = \frac{\sum_n \sum_k TFR_d(n,k) TFR_e(n,k)}{\sqrt{\sum_n \sum_k TFR_d^2(n,k) TFR_e^2(n,k)}} \quad (10)$$

همبستگی بسامد لحظه‌ای معیاری از شکل کلی نمایش زمان-بسامد بر حسب بسامدهای لحظه‌ای است و این گونه تعریف می‌شود:

$$IF = \frac{\sum_n \sum_k \overline{TFR_d(n,k)} \overline{TFR_e(n,k)}}{\sqrt{\sum_n \sum_k \overline{TFR_d^2(n,k)} \overline{TFR_e^2(n,k)}}} \quad (11)$$

که علامت  $\overline{\quad}$  دلالت بر نوعی نرمالیزاسیون  $TFR_d$  و  $TFR_e$  به این شکل دارد:

$$\overline{TFR_e(n,k)} = \begin{cases} 1 & \overline{TFR_e(n,k)} > \frac{2 \sum_n \sum_k TFR_e(n,k)}{N^2} \\ 0 & \overline{TFR_e(n,k)} \leq \frac{2 \sum_n \sum_k TFR_e(n,k)}{N^2} \end{cases} \quad (12)$$

معیار سوم که تفکیک‌پذیری زمان-بسامد نام دارد، تمرکز انرژی و تفکیک‌پذیری را اندازه می‌گیرد:

$$RES = \frac{\sum_n B(n)}{N} \cdot \frac{\sum_k T(k)}{N} \quad (13)$$

که،

$$B(n) = \frac{\sum_k TFR_e(n,k)}{\max_k TFR_e(n,k)} \quad (14)$$

$$T(k) = \frac{\sum_n TFR_e(n,k)}{\max_n TFR_e(n,k)}$$

### ۳.۱.۱. مقایسه کمی

اینکه چه نمایش زمان-بسامدی تفکیک‌پذیری بهتری دارد، می‌تواند به صورت کیفی و دیداری انجام شود. از طرفی نمایش مطلوب زمان-بسامد می‌تواند بر مبنای کاربرد مورد نظر باشد و به عبارت دیگر هدف از استفاده از تحلیل زمان-بسامد تعیین می‌کند که چه نمایشی مناسب‌تر است. اگرچه برای بررسی کمی عملکرد روش‌های زمان-بسامد و اندازه‌گیری تفکیک‌پذیری و تمرکز انرژی نمایش‌های زمان-بسامد چندین روش ارائه شده‌اند (رنکاین و همکاران، ۲۰۰۵؛ استانکوویچ، ۲۰۰۱؛ بواشاش، ۱۹۹۱؛ جونز و پارکس، ۱۹۹۰)، در این مقاله از سه معیار عملکرد پیشنهاد شده توسط رنکاین و همکاران (۲۰۰۵) استفاده می‌شود. این سه معیار عبارتند از: همبستگی دوبعدی، همبستگی بسامد لحظه‌ای و تفکیک‌پذیری زمان-بسامد. معیار همبستگی دوبعدی، بر حسب توزیع انرژی، تفاوت بین نمایش‌های زمان-بسامد مطلوب  $TFR_d$  و تخمین زده شده  $TFR_e$  را تعیین می‌کند و این گونه تعریف می‌شود:

مقاطع تک‌بسامد و C80 از تحلیل زمان-بسامد داده‌های لرزه‌ای استخراج شده و نتایج با هم مقایسه می‌شوند. شکل ۲ یک مقطع لرزه‌ای دوبعدی پس از برانبارش را نشان می‌دهد که از مجموعه داده‌های لرزه‌ای مربوط به یک مخزن گازی در ایران جدا شده است. این مقطع شامل ۵۱۲ ردلرزه با طول زمانی ۹۸۴ میلی‌ثانیه و بازه نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه است. سطح مخزن به صورت یک بازتابنده قوی با فلش سیاه‌رنگ مشخص است.

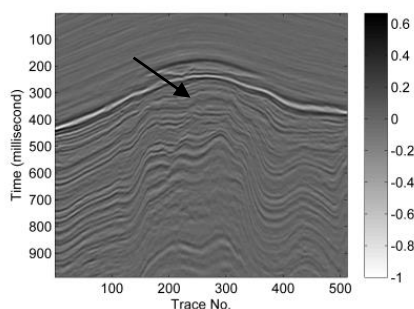
### ۳.۲.۱. نشانگرهای دامنه لحظه‌ای، بسامد لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی

در یک نمایش زمان-بسامد مربوط به یک سیگنال، در هر لحظه زمانی، یک توزیع بسامدی وجود دارد که به طیف محلی موسوم است. در هر طیف محلی دامنه بیشینه معرف دامنه لحظه‌ای زمان-بسامد در آن لحظه است و بسامدی که در آن مقدار بیشینه دامنه رخ می‌دهد، بسامد لحظه‌ای غالب زمان-بسامد در آن لحظه است. از تقسیم دامنه لحظه‌ای بر ریشه دوم بسامد لحظه‌ای غالب معیاری حاصل می‌شود که تحت عنوان فاکتور شیرینی شناخته می‌شود (ریدل و همکاران، ۲۰۱۰؛ هارت، ۲۰۰۸):

$$SF_{TF} = \frac{A_{TF}(t)}{\sqrt{f_{TF}(t)}} \quad (15)$$

جدول ۲. ارزیابی عملکرد نمایش‌های زمان-بسامد سیگنال نشان داده‌شده در شکل ۱ توسط معیارهای  $\rho$  و  $IF$  و  $RES$ .

روش TFR	معیار عملکرد		
	$\rho$	$IF$	$RES$
STFT	۰/۶۵	۰/۴۲	۱
SST	۰/۷۹	۰/۹۵	۰/۵۲
روش پیشنهادی	۱	۱	۰/۲۴



شکل ۲. مقطع لرزه‌ای مربوط به یک مخزن گازی در ایران؛ سطح مخزن به صورت یک بازتابنده قوی با فلش سیاه‌رنگ مشخص است.

برای مقایسه بهتر و دستیابی به یک عملکرد نسبی بین چند TFR بهتر است که هر کدام از سه معیار (۱۰)، (۱۱) و (۱۳) برای هر TFR بر مقدار حداکثر آن معیار در بین TFRها تقسیم و نرمالیزه شود. در این صورت برای  $\rho$  و  $IF$  مقدار ۱ و برای  $RES$  مقدار صفر دلالت بر بهترین عملکرد TFR دارد.

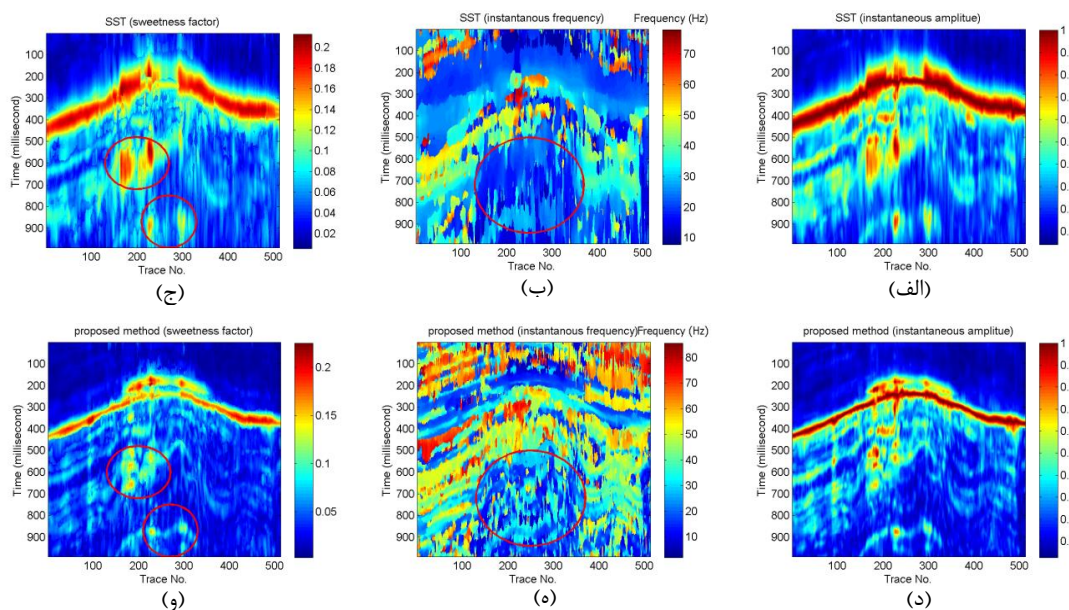
با توجه به معیارهای تعریف‌شده، یک آزمایش کمی برای نمایش‌های زمان-بسامد شکل ۱ انجام گرفت و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، نمایش زمان-بسامد پیشنهادی بهترین عملکرد را داشته است.

### ۳.۲. کاربرد لرزه‌ای

در این بخش عملکرد روش زمان-بسامد پیشنهادی در رابطه با تحلیل زمان-بسامد داده‌های لرزه‌ای بررسی می‌شود. کاربردی که در این مقاله در نظر گرفته شده است، تفسیر داده‌های لرزه‌ای با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای طیفی محلی برای آشکارسازی نواحی گازدار و سایه‌های کم‌بسامد است. این نشانگرها از تحلیل زمان-بسامد داده‌های لرزه‌ای به دست می‌آیند. در این بخش با استفاده از روش SST و روش پیشنهادی، پنج نشانگر دامنه لحظه‌ای، بسامد لحظه‌ای غالب، فاکتور شیرینی،

مخزنی و نیز بیضی‌های قرمز رنگ نواحی کم‌بسامد در حدود ۱۰ تا ۱۵ هرتز را نشان می‌دهد که به‌عنوان نواحی محتمل گازدار یا سایه کم- بسامد تفسیر می‌شود. در داده‌های لرزه‌ای مربوط به مخازن گازی، سایه کم- بسامد ناحیه‌ای در محل مخزن و زیر ناحیه مخزنی است که تحت تأثیر تضعیف ناشی از گاز، دارای بسامد غالب کم هستند (سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاستاگنا و همکاران، ۲۰۰۳). در مقطع نشانگر فاکتور شیرینی می‌توان تلفیقی از نتایج دو مقطع دامنه لحظه‌ای زمان- بسامد و نیز بسامد لحظه‌ای غالب زمان- بسامد را تفسیر کرد. مقادیر زیاد فاکتور شیرینی طبق رابطه ۱۵ ناشی از سه حالت است: اول) دامنه زیاد (مرز بازتابنده قوی)، دوم) بسامد کم (حضور گاز یا سایه‌های کم- بسامد) و سوم) دامنه زیاد و بسامد کم (ناحیه مخزنی). بنابراین بی‌هنجاری‌های قوی در مقاطع نشانگر فاکتور شیرینی (شکل ۳-ج و شکل ۳-و) در قسمت سطح مخزن به‌عنوان یک ناحیه انباشت گاز (حالت سوم) و ناحیه داخل بیضی‌های قرمز رنگ ناشی از سایه‌های کم- بسامد (حالت دوم) است.

فاکتور شیرینی یک نشانگر لرزه‌ای است که برای تشخیص نقاط شیرین روی داده‌های لرزه‌ای به کار می‌رود. نقاط شیرین نقاطی هستند که مستعد حضور نفت و گاز می‌باشند و اغلب با دامنه‌های زیاد و بسامدهای کم شناخته می‌شوند و بنابراین فاکتور شیرینی در این نقاط مقدار بالایی دارد. شکل ۳ مقاطع نشانگر دامنه لحظه‌ای زمان- بسامد، بسامد لحظه‌ای غالب زمان- بسامد و فاکتور شیرینی را برای مقطع لرزه‌ای شکل ۲ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از SST در شکل‌های ۳-الف تا ۳-ج و نتایج حاصل از روش TFR پیشنهادی در شکل‌های ۳-د تا ۳-ه نشان داده شده است. با مقایسه نتایج دو روش می‌توان دید که روش پیشنهادی، مقاطع با تفکیک پذیری و تمرکز انرژی بالاتری در مقایسه با SST ارائه کرده است. ناحیه بی‌هنجاری قوی در مقطع نشانگر دامنه لحظه‌ای زمان- بسامد (شکل ۳-الف و شکل ۳-د) بازتابنده سطح مخزن را نشان می‌دهد. مقاطع نشانگر بسامد لحظه‌ای غالب زمان- بسامد (شکل ۳-ب و شکل ۳-ه) مقدار بسامد غالب را در نواحی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، محدوده سطح



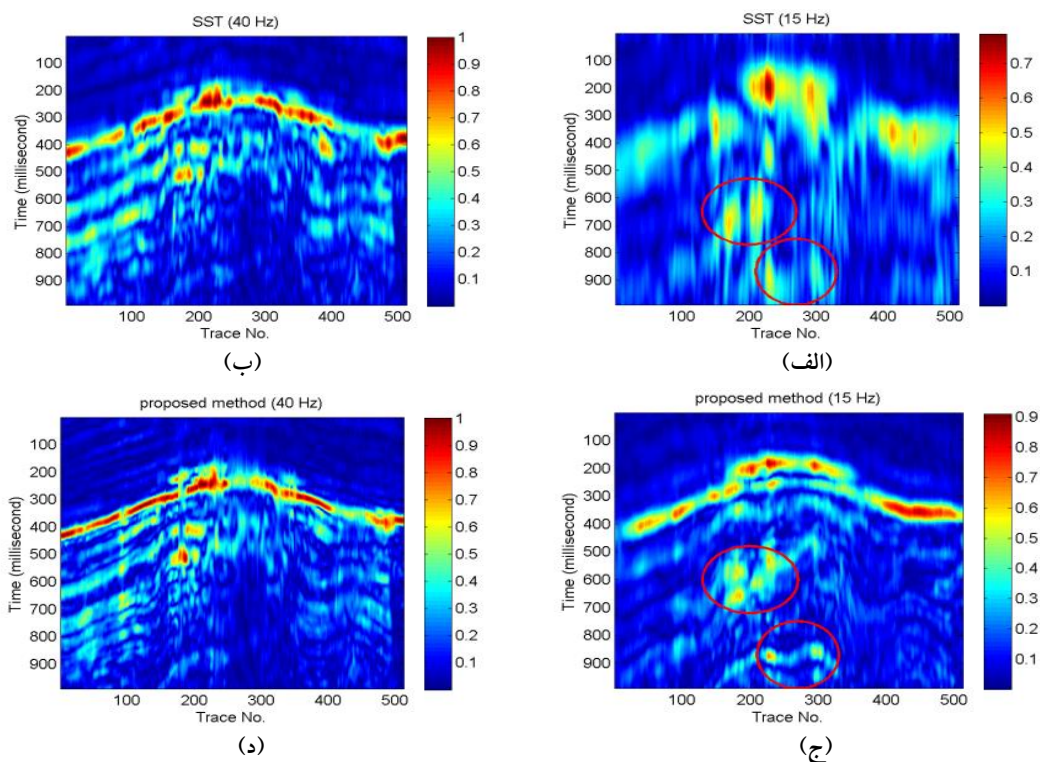
شکل ۳. مقاطع نشانگرهای زمان- بسامد مقطع لرزه‌ای شکل ۲؛ مقاطع نشانگر دامنه لحظه‌ای، بسامد لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی به ترتیب در (الف) تا (ج) حاصل از SST و در (د) تا (و) حاصل از روش پیشنهادی هستند. بی‌هنجاری‌های قوی در (الف) و (د) بازتابنده سطح مخزن را نشان می‌دهند. بی‌هنجاری‌های ضعیف در سطح مخزن و بیضی‌های قرمز رنگ در (ب) و (ه) به‌عنوان نواحی گازدار و نواحی کم- بسامد تفسیر می‌شوند. در (ج) و (و) بی‌هنجاری‌های قوی در قسمت سطح مخزن به‌عنوان یک ناحیه انباشت گاز و بیضی‌های قرمز رنگ ناشی از سایه‌های کم- بسامد هستند.



## ۳.۲.۲. نشانگر مقطع تک بسامد

یکی از معروف ترین نشانگرهای زمان-بسامد در تفسیر داده های لرزه ای نشانگر مقطع تک بسامد است؛ به این ترتیب که با انتقال یک مجموعه داده لرزه ای دوبعدی به حوزه زمان-بسامد، حجمی سه بعدی حاصل می شود که بعد سوم بسامد خواهد بود. با اعمال برش روی محور بسامد حجم حاصل، مقطعی دوبعدی حاصل خواهد شد که به مقطع تک بسامد لرزه ای موسوم است. از این نشانگر به عنوان نشانگر مستقیم هیدروکربن استفاده می شود (کاستاگنا و همکاران، ۲۰۰۳). شکل ۴ مقاطع تک بسامد ۱۵ و ۴۰ هرتزی مقطع لرزه ای شکل ۲ را نشان می دهد. نتایج حاصل از SST در شکل های ۴-الف و ۴-ب و نتایج روش پیشنهادی در شکل های ۴-ج و ۴-د نشان داده شده اند. در تفسیر این مقاطع می توان گفت که بی هنجاری های قوی زیر سطح مخزن که با بیضی های قرمز رنگ در مقاطع ۱۵ هرتزی نشان داده شده اند، به

احتمال زیاد سایه های کم بسامد هستند. دلیل این تفسیر این است که این بی هنجاری ها در مقطع تک بسامد بالاتر یعنی مقطع ۴۰ هرتزی ناپدید می شوند (سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاستاگنا و همکاران، ۲۰۰۳). بی هنجاری های سطح مخزن می توانند ناشی از حضور گاز وابسته به بی هنجاری های AVO درجه سه (راثرفورد و ویلیامز، ۱۹۸۹) باشند. به خاطر نبود دسترسی به اطلاعات چاه، با استناد به نتایج مطالعات مشابه با این مقاله که توسط سینها و همکاران (۲۰۰۵) و مارفورت و کرلین (۲۰۰۱) انجام گرفته است، می توان دیگر بی هنجاری های قوی را که در مقطع تک بسامد ۱۵ هرتزی وجود دارند و در مقطع تک بسامد ۴۰ هرتزی باقی می مانند، به پدیده تیونینگ (tuning) لایه نازک مرتبط دانست. همچنین دیده می شود که بی هنجاری های توضیح داده شده در مقاطع حاصل از روش پیشنهادی در مقایسه با بی هنجاری های موجود در مقاطع حاصل از SST تمرکز بیشتری دارد.



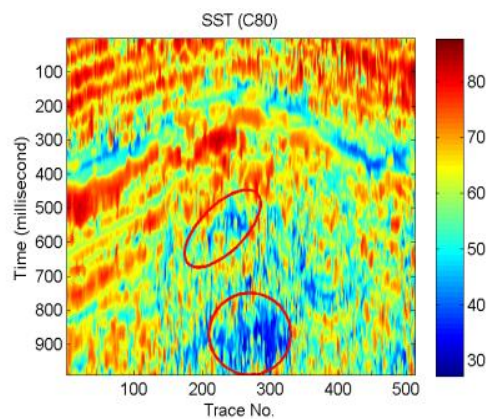
شکل ۴. مقاطع نشانگر تک-بسامد مقطع لرزه ای شکل ۲: مقاطع ۱۵ هرتزی و ۴۰ هرتزی حاصل از SST بترتیب در (الف) و (ب) و حاصل از روش پیشنهادی بترتیب در (ج) و (د) نشان داده شده اند. بیضی های قرمز رنگ در (الف) و (ج) به عنوان سایه های کم بسامد و بی هنجاری های سطح مخزن ناشی از حضور گاز، وابسته به بی هنجاری های AVO درجه سه، تفسیر می شوند.



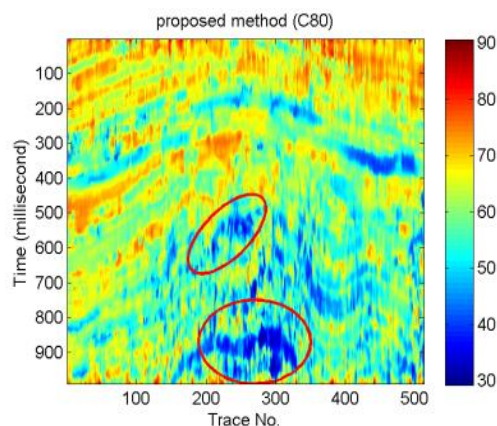
مقادیر کوچک بسامد C80، نشانگر تمرکز انرژی در بخش پایین پهنای باند کل است و مقادیر بزرگ بسامد دلالت بر طیف وسیع دارند. همچنین مقادیر کوچک، نشانگر نواحی با تضعیف زیاد موجک منتشره هستند. شکل‌های ۵-الف و ۵-ب مقاطع نشانگر C80 به دست آمده از تحلیل زمان-بسامد مقطع لرزه‌ای شکل ۲ را نشان می‌دهند که به ترتیب توسط روش SST و روش پیشنهادی به دست آمده‌اند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانسته است مقطعی با تمرکز انرژی بالاتر و به هم ریختگی کمتری در مقایسه با SST ارائه کند. مقیاس رنگ در این شکل‌ها بسامد C80 را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در ناحیه مخزن و نیز نواحی زیر مخزن که با بیضی‌های قرمز رنگ نشان داده شده است، بسامد C80 در حد پایین‌تری در مقایسه با نواحی دیگر قرار دارد که این ناشی از تضعیف در اثر وجود گاز و نیز سایه‌های کم بسامد است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد شد که با استفاده از یک معیار تمرکز انرژی و از طریق بهینه‌سازی، پنجره‌های گوسی بهینه‌ای را برای به کارگیری در تبدیل S پیدا می‌کند و قادر است یک نقشه زمان-بسامد با تفکیک پذیری و تمرکز انرژی زیاد تولید کند. اعمال روش روی سیگنال مصنوعی ناپایا عملکرد بهتر روش پیشنهادی را در مقایسه با STFT و تبدیل SST هم به لحاظ کیفی و هم به لحاظ کمی نشان داد. همچنین در این مقاله پنج نشانگر محلی زمان-بسامد دامنه لحظه‌ای، بسامد لحظه‌ای غالب، فاکتور شیرینی، مقطع تک بسامد و بسامد C80 در تفسیر داده لرزه‌ای یک مخزن گازی به کار گرفته شد و نواحی حاوی گاز و نیز سایه‌های کم بسامد تفسیر شدند. همین‌طور نشان داده شد که نشانگرهای محلی حاصل از روش زمان-بسامد پیشنهادی تفکیک پذیری دقیق‌تری از روش SST دارند.



(الف)



(ب)

شکل ۵. مقاطع نشانگر C80 حاصل از تحلیل زمان-بسامد مقطع لرزه‌ای شکل ۲؛ (الف) نتیجه حاصل از SST و (ب) نتیجه حاصل از روش پیشنهادی است. نواحی بی‌هنجار کم‌دامنه (متناظر با بسامد C80 کم) در سطح مخزن و درون بیضی‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده تضعیف در اثر گاز و سایه‌های کم بسامد است.

#### ۳.۲.۳. نشانگر C80

نشانگر درصد دامنه نسبی تجمیعی یا C80 یکی دیگر از نشانگرهای لرزه‌ای زمان-بسامد است که بیانگر بسامدی است که در آن انرژی طیفی تجمیعی ۸۰ درصد انرژی طیفی کل است. به عبارت دیگر بسامد C80 بسامدی است که در آن سطح زیر منحنی طیف دامنه محلی بین بسامد صفر و بسامد C80، ۸۰ درصد سطح زیر منحنی طیف دامنه محلی بین بسامد صفر و بسامد نایکوئست باشد (پرز، ۲۰۰۱؛ فن در بان و همکاران، ۲۰۱۰):

$$f_{80}(t) : \int_0^{f_{80}} TFR(t, f) df = 0.80 \int_0^{f_{Nyquist}} TFR(t, f) df \quad (16)$$

مراجع

- Boashash, B., 1991, Time-frequency signal analysis in advances in spectrum analysis and array processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Castagna, J. P., Sun, S. and Seigfried, R. W., 2003, Instantaneous spectral analysis: detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons, *The Leading Edge*, 22, 120-127.
- Chopra, S. and Marfurt, K. J., 2005, Seismic attributes-A historical perspectives, *Geophysics*, 70, 3S0-28S0.
- Djurovic, I., Sejdic, E. and Jiang, J., 2008, Frequency-based window width optimization for S-transform, *Int. J. Elect. Commun.*, 62, 245-250.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication, *J. Inst. Elect. Eng.*, 93, 429-457.
- Gholami, A., 2013, Sparse time-frequency decomposition and some applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 3598-3604.
- Hart, B. S., 2008, Channel detection in 3-D seismic data using sweetness, *AAPG Bulletin*, 92, 733-742.
- Herrera, R. H., Han, J. and van der Baan, M., 2014, Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis, *Geophysics*, 79, V55-V64.
- Hurley, N. and Rickard, S., 2009, Comparing measures of sparsity, *IEEE transactions on information theory*, 55, 4723-4741.
- Jones, D. and Baraniuk, G., 1994, A simple scheme for adapting time-frequency representation, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42, 3530-3535.
- Jones, D. and Parks, T., 1990, A high resolution data-adaptive time-frequency representation: *IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 38, 2127-2135.
- Liu, G., Fomel, S. and Chen, X., 2011, Time-frequency analysis of seismic data using local attributes, *Geophysics*, 76, P23-P34.
- Mallat, S., 1999, A wavelet tour of signal processing, 2 ed., Academic Press, San Diego, California.
- Marfurt, K. J. and Kirilin, R. L., 2001, Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning, *Geophysics*, 66, 1274-1283.
- McFadden, P. D., Cook, J. G. and Forster, L. M., 1999, Decomposition of gear vibration signals by the generalized S-transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13, 691-707.
- Perz, M., 2001, Coals and their confounding effects, *CSEG Recorder*, 26, 34-53.
- Pinnegar, R. C. and Mansinha, L., 2003, The S-transform with windows of arbitrary and varying shape, *Geophysics*, 68, 381-385.
- Rankine, L., Stevenson, N., Mesbah, M. and Boashash, B., 2005, A quantitative comparison of non-parametric time-frequency representations, 13th European Signal Processing Conference (EUSIPCO2005), Antalya, Turkey.
- Riedel, M., Collett, T. S., Kumar, P., Sathe, A. V. and Cook, A., 2010, Seismic imaging of a fractured gas hydrate system in the Krishnae-Godavari Basin offshore India, *Marine and Petroleum Geology*, 27, 1476-1493.
- Rutherford, S. R. and Williams, R. H., 1989, Amplitude-versus-offset variations in gas sands, *Geophysics*, 54, 680-688.
- Sahu, S. S., Panda, G. and George, N. V., 2009, An improved S-transform for time-frequency analysis, *IEEE International Advance Computing Conference*, Patiala, India.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D. and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform, *Geophysics*, 70, P19-P25.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L. and Lowe, R., 1996, Localization of the complex spectrum, The S-transform, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44, 998-1001.
- Stockwell, R. G., 2007, Why use the S-Transform?, *AMS Pseudo differential operators, partial differential equations and time-frequency analysis*, 52, 279-309.
- Stankovic, L., 2001, A measure of sometime-frequency distributions concentration, *Signal Processing*, 81, 212-223.
- Van der Baan, M., Fomel, S. and Perz, M., 2010, Non-stationary phase estimation: a tool for seismic interpretation?, *The Leading Edge*, 29, 1020-1026.
- Wu, X. and Liu, T., 2009, Spectral decomposition of seismic data with reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, *Journal of Applied Geophysics*, 68, 386-393.
- Xue, Y. J., Cao, J. X. and Tian, R. F., 2013, A comparative study on hydrocarbon detection using three EMD-based time-frequency analysis methods, *Journal of Applied Geophysics*, 89, 0926-9851.