

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

# استخراج نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از تبدیل S فشرده شده همزمان

نگارنده:

سهیل پاکسیما

اساتید راهنما

دکتر محمدرداد

دکتر امین روشندل کاهو

استاد مشاور

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

بهمن ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برام بوده اند.

و همچنین تقدیم به:

برادر و خواهر عزیزم که همراهان همیشگی و پشتوانه های زندگیم هستند.

## مشمکرو قدردانی

سپاس فراوان از وجود اساتید بزرگوار و ارجمند جناب آقایان دکتر محمد رداد دکتر این روشن دل کا هو، دکتر مهرداد سلیمانی  
منقر که با جان و دل همیار و همراه مسیر نا هموار بنده بودند و بدون راهنمایی های آن هاتمین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.  
از داوران گرامی جناب دکتر علی نجاتی کلاته و دکتر ابولقاسم کاکار روحانی که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده گرفته اند،  
بسیار سپاسگزارم. همچنین از تمام دوستانی که در این مسیر مریاری رسانده اند سپاسگزارم.

# تعمدنامه

اینجانب سهیل پاکسیما دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه-شناسی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تولید نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از تبدیل S فشرده شده همزمان تحت راهنمایی دکتر محمد رداد و دکتر امین روشندل کاهو متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## حکیده

نشانگرهای لرزه‌ای زمان - فرکانس کاربرد فراوانی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای با اهداف مختلف اکتشافی از جمله شناسایی ساختارهای زیرسطحی و نیز نواحی حاوی هیدروکربن دارند. اگرچه میزان دقت این نشانگرها تابعی از روش تحلیل زمان - فرکانس اعمال شده بر داده‌ها می‌باشد. در سیگنال‌های لرزه‌ای برای به دست آوردن تفکیک زمانی و فرکانسی مناسب از تبدیل‌های زمان - فرکانس متنوعی استفاده شده است که می‌توان به تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل S و تبدیل موجک اشاره کرد که هر یک از آنها مزایا و معایب خود را دارند. تبدیل S در سال‌های متمادی توسط محققین مختلف در تحلیل زمان - فرکانس نتایج قابل قبولی داشته است. اگرچه به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ این تبدیل قادر نیست تفکیک زمان - فرکانس همزمان قابل قبولی ارائه کند. بدین منظور روش‌های زیادی برای بالا بردن تفکیک این تبدیل ارائه شده‌اند. یکی از این روش‌ها روش فشرده‌سازی همزمان می‌باشد. این روش بعنوان یک روش پس‌پردازشی مشکل اصل عدم قطعیت را ندارد و قادر است انرژی پخش شده در صفحه زمان - فرکانس را که باعث شده است که قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی کاهش پیدا کند را به موقعیت اصلی زمانی و فرکانسی منتقل کند. این تکنیک بر روی روش‌های تحلیل زمان - فرکانس مختلف از جمله تبدیل S انجام شده است.

در این پایان‌نامه، هدف بررسی عملکرد تبدیل S فشرده شده همزمان در تحلیل زمان - فرکانس داده‌های لرزه‌ای به منظور استخراج نشانگرهای مختلف زمان - فرکانس است. از نشانگرهای حاصل از این روش در زمینه آشکارسازی گاز و سایه‌های فرکانس پایین بر روی یک مجموعه داده لرزه‌ای استفاده می‌شود. نشانگر-های زمان - فرکانس استفاده شده در این روش عبارت‌اند از: دامنه لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای، فاکتور شیرینی، فرکانس C80، فرکانس لحظه‌ای متوسط، پهنای باند فرکانس لحظه‌ای، ضریب کیفیت متوسط و مقطع تک فرکانس. نتایج نشان داده‌اند که به دلیل ارائه قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی بالا توسط روش

تبدیل S فشرده شده همزمان، نشانگرهای لرزه‌ای حاصل از آن نیز توانایی بهتری در آشکارسازی سایه‌های

کم - فرکانس نسبت به نشانگرهای حاصل از تبدیل S استاندارد دارد.

**کلمات کلیدی:** نمایش زمان - فرکانس، تبدیل S، فشرده‌سازی همزمان، نشانگرهای لرزه‌ای، گاز



# فهرست مطالب

## فصل ۱: کلیات ۱

- ۱-۱ مقدمه ..... ۲
- ۲-۱ سابقه موضوع ..... ۳
- ۳-۱ ضرورت انجام تحقیق ..... ۷
- ۴-۱ ساختار پایان نامه ..... ۷

## فصل ۲: مبانی نظری روش ۹

- ۱-۲ مقدمه ..... ۱۰
- ۲-۲ تبدیل فوریه ..... ۱۰
- ۳-۲ تبدیل فوریه زمان کوتاه ..... ۱۱
- ۱-۳-۲ تفکیک پذیری شکل و پهنای پنجره ..... ۱۲
- ۴-۲ تبدیل S ..... ۱۴
- ۵-۲ تبدیل S تعمیم یافته (GST) ..... ۱۶
- ۶-۲ روش بازچینی ..... ۱۹
- ۷-۲ تبدیل فوریه زمان کوتاه فشرده شده همزمان ..... ۲۲
- ۸-۲ تئوری روش تبدیل S فشرده شده همزمان ..... ۲۴

## فصل ۳: نشانگرهای لرزه‌ای ۲۷

- ۱-۳ مقدمه ..... ۲۸
- ۲-۳ نشانگرهای زمان - فرکانس ..... ۲۹
- ۱-۲-۳ نشانگرهای دامنه‌ی لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای غالب و فاکتور شیرینی ..... ۳۰

۳۰.....C۸۰ ۲-۲-۳ فرکانس

۳۱..... ۳-۲-۳ نشانگر فرکانس لحظه‌ای متوسط و پهنای باند فرکانس لحظه‌ای

۳۲..... ۴-۲-۳ ضریب کیفیت متوسط

۳۲..... ۵-۲-۳ نشانگر مقطع تک فرکانس

## فصل ۴: ارزیابی روش ۳۵

۳۶..... ۱-۴ مقدمه

۳۶..... ۲-۴ پیاده‌سازی بر روی داده مصنوعی

۳۶..... ۱-۲-۴ سیگنال مصنوعی اول

۳۹..... ۲-۲-۴ سیگنال مصنوعی دوم

۴۲..... ۳-۲-۴ سیگنال مصنوعی سوم

۴۵..... ۴-۲-۴ سیگنال مصنوعی چهارم

۴۸..... ۳-۴ استخراج نشانگرهای زمان - فرکانس از داده‌ی واقعی

## فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۱

۶۲..... ۱-۵ نتیجه‌گیری

۶۲..... ۲-۵ پیشنهادها

## مراجع ۶۳

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: مقایسه تفاوت سه پنجره همینگ، هنینگ و گاوسین ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: (الف) پهنای پنجره در تبدیل S (ب) پهنای پنجره در تبدیل GST ..... ۱۹
- شکل ۱-۴: نمایش زمان - فرکانس حاصل از یک سیگنال مصنوعی لرزه‌ای (الف) نمایش سیگنال در حوزه ی زمان (ب) نمایش سیگنال در حوزه ی فرکانس ..... ۳۷
- شکل ۲-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل STFT با پنجره ی کوتاه (ب) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل STFT با پنجره ی بلند ..... ۳۸
- شکل ۳-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل S (ب) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل S فشرده شده ی همزمان (ج) نمایش سیگنال بازسازی شده ..... ۳۹
- شکل ۴-۴: نمایش زمان - فرکانس یک سیگنال چیرپ دوگانه که یک موجک مورلت در زمان ۰/۵ ثانیه با فرکانس غالب ۱۵۰ هرتز و موجک دیگر در زمان ۱/۶ ثانیه و فرکانس غالب ۲۵ هرتز تشکیل شده است. (الف) نمایش سیگنال در حوزه ی زمان (ب) نمایش سیگنال در حوزه ی فرکانس ..... ۴۰
- شکل ۵-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل STFT با پنجره ی کوتاه (ب) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل STFT با پنجره ی بلند ..... ۴۱
- شکل ۶-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل S (ب) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل S فشرده شده ی همزمان (ج) سیگنال بازسازی شده ی تبدیل S فشرده شده ی همزمان ..... ۴۲
- شکل ۷-۴: نمایش زمان - فرکانس یک سیگنال لرزه‌ای بدون نوفه (الف) نمایش در حوزه ی زمان (ب) نمایش در حوزه ی فرکانس ..... ۴۳
- شکل ۸-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره ی کوتاه (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره ی بلند ..... ۴۴
- شکل ۹-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S فشرده شده ی همزمان (ج) سیگنال بازسازی شده ی تبدیل S فشرده شده ی همزمان ..... ۴۵
- شکل ۱۰-۴: نمایش زمان - فرکانس یک داده ی لرزه‌ای دارای نوفه (الف) نمایش در حوزه ی زمان. (ب) نمایش در حوزه ی فرکانس ..... ۴۶
- شکل ۱۱-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره ی کوتاه (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره ی بلند ..... ۴۶
- شکل ۱۲-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S فشرده شده ی همزمان (ج) سیگنال بازسازی شده ی تبدیل S فشرده شده ی همزمان ..... ۴۷
- شکل ۱۳-۴: (الف) منطقه مورد مطالعه (ب) ستون چینه نگاری منطقه مورد مطالعه و سازند هدف، که مربوط به یک مخزن گاز است [73] ..... ۴۹

شکل ۴-۱۴: نمایش سه بعدی مکعب داده های لرزه‌ای، که ساختار ساده میدان مطالعه، بسترهای نازک و تشکیلات مخزن لایه نازک در افق‌های K۱ و K۴ که به سختی قابل تفکیک هستند را نشان می‌دهد. .... ۵۰

شکل ۴-۱۵: (الف) inline انتخاب شده از مکعب داده لرزه‌ای سه بعدی. تشکیلات مخزن هدف، K۱ و K۴ به ترتیب با خطچین قرمز و زرد نشان داده شده‌اند. خطچین سیاه محل چاه اکتشافی را نشان می‌دهد (ب) طیف دامنه درونیابی شده و منحنی قرمز رنگ، طیف دامنه هموار شده را نشان می‌دهد. .... ۵۰

شکل ۴-۱۶: (الف) نشانگر دامنه لحظه‌ای با استفاده از روش ST بدست آمده است (ب) نشانگر دامنه لحظه‌ای بدست آمده با روش SST (ج) نشانگر فرکانس اوج لحظه‌ای بدست آمده با روش ST (د) نشانگر فرکانس اوج لحظه‌ای بدست آمده با روش SST. (ن) نشانگر فاکتور شیرینی با روش ST بدست آمده است (و) نشانگر فاکتور شیرینی با روش SST بدست آمده است (ه) نشانگر فرکانس ۸۰C با استفاده از روش ST و (ی) نشانگر فرکانس ۸۰C با روش SST بدست آمده است. .... ۵۴

شکل ۴-۱۷: (الف) و (ب) نشانگر فرکانس متوسط لحظه‌ای است که به ترتیب با روش ST و SSST بدست می‌آید و (ج) و (د) به ترتیب نشانگر پهنای باند فرکانس فوری به دست آمده با روش ST و SSST هستند و (ن) و (و) نشانگر Q ضریب کیفیت لحظه‌ای Q است که با استفاده از روش ST و SSST بدست آمده است. .... ۵۵

شکل ۴-۱۸: مقطع‌های نشانگر تک فرکانس لرزه‌ای به دست آمده برای (الف) فرکانس ۱۵ هرتز در تبدیل ST (ب) فرکانس ۱۵ هرتز در تبدیل SSST (ج) فرکانس ۳۰ هرتز در تبدیل ST (د) فرکانس ۳۰ هرتز در تبدیل SSST (ن) فرکانس ۴۵ هرتز در تبدیل ST (و) فرکانس ۴۵ هرتز در تبدیل SSST. .... ۵۸

شکل ۴-۱۹: تفاوت برش برای (الف) ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به روش ST بدست آمده است (ب) ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به روش SSST بدست آمده است (ج) ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به روش ST بدست آمده است (د) ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به روش SSST بدست آمده است. .... ۵۹

# فهرست علائم

| عنوان کامل به فارسی            | عنوان کامل به لاتین                  | علامت اختصاری به لاتین |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| تبدیل فوریه زمان کوتاه         | Short Time Fourier Transform         | STFT                   |
| تبدیل استاکول                  | Stockwell Transform                  | ST                     |
| توزیع ویگنر ویل                | Wigner Ville Distribution            | WVD                    |
| تجزیه مد تجربی                 | Emprical Mode Decomposition          | EMD                    |
| تبدیل موجک                     | Wavelet Transform                    | WT                     |
| تبدیل استاکول فشرده شده همزمان | Synchrosqueesing Stockwell Transform | SSST                   |
| روش بازچینی                    | Reassignment Method                  | RM                     |
| تبدیل استاکول تعمیم یافته      | Generalized Stockwell Transform      | GST                    |
| زمان فرکانس                    | Time Frequency                       | TF                     |
| تبدیل فشرده شده همزمان         | Synchrosqueesing Transform           | SST                    |

# فصل ۱: کلیات

## ۱-۱ مقدمه

سیگنال‌های لرزه‌ای از جنس سیگنال‌های ناپایا هستند که محتوی فرکانسی متغیر با زمان دارند و برای تحلیل آنها به تبدیل‌هایی نیاز است که اطلاعات زمانی و فرکانسی را به صورت همزمان ارائه دهند. تبدیل فوریه<sup>۱</sup> سیگنال را از حوزه‌ی زمان<sup>۲</sup> به حوزه‌ی فرکانس<sup>۳</sup> منتقل می‌کند اما در مورد سیگنال‌های ناپایا به این دلیل که اطلاعاتی از زمان و فرکانس به صورت همزمان ارائه نمی‌دهد یا به عبارت دیگر اطلاعاتی از زمان وقوع یک فرکانس ارائه نمی‌دهد در مورد سیگنال‌های ناپایا کارایی چندانی نخواهد داشت. بدین منظور تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه<sup>۴</sup> (STFT) معرفی شد [۱] که در این تبدیل یک پنجره با پهنای ثابت بر سیگنال ناپایا اعمال می‌شود و سیگنال را به قطعات زمانی تقسیم می‌کند که هر کدام از آنها را به صورت یک سیگنال پایا می‌توان در نظر گرفت و سپس بر روی هر کدام از این قطعات تبدیل فوریه اعمال می‌شود و نمایش زمان - فرکانس را ایجاد می‌نماید اما به دلیل اینکه پهنای پنجره مورد استفاده ثابت است تفکیک زمانی و فرکانسی در طول کل سیگنال یکسان است. یعنی برای فرکانس‌های بالا و پایین یک نوع پنجره مورد استفاده قرار می‌گیرد که باعث می‌شود تفکیک زمانی و فرکانسی ضعیفی ارائه دهد. اگر طول پنجره کوچک در نظر گرفته شود چون پنجره‌زنی در حوزه زمان صورت می‌گیرد، تفکیک زمانی خوبی خواهد داشت و به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ<sup>۵</sup> تبدیل فرکانسی ضعیفی ارائه می‌دهد. اگر پهنای پنجره بیشتر در نظر گرفته شود، تفکیک زمانی ضعیف و تفکیک فرکانسی بهبود خواهد یافت که در نهایت یک تفکیک‌پذیری مناسب برای زمان و فرکانس نخواهیم داشت. در ادامه روش‌های مختلفی از تحلیل زمان - فرکانس معرفی شدند که می‌توان به تبدیل موجک پیوسته<sup>۶</sup> (CWT) [۲]، تبدیل (S) [۳]، توزیع ویگنر-ویل<sup>۸</sup> (WVD) [۴] و تجزیه‌ی مد تجربی<sup>۹</sup> (EMD) [۵]، اشاره کرد.

<sup>۱</sup> Fourier Transform

<sup>۲</sup> Time domain

<sup>۳</sup> Frequency domain

<sup>۴</sup> Short Time Fourier Transform

<sup>۵</sup> Uncertainty Principle of Heisenberg

<sup>۶</sup> Continuous Wavelet Transform

<sup>۷</sup> Stockwell Transform

<sup>۸</sup> Wigner Ville Distribution

<sup>۹</sup> Empirical Mode Decomposition

یک تکنیک نسبتاً جدید در زمینه‌ی دستیابی به نمایش زمان - فرکانس با تفکیک‌پذیری بالا، تبدیل فشرده‌ساز همزمان<sup>۱</sup> می‌باشد [۶]. این تکنیک بر روی نمایش‌های زمان - فرکانس حاصل از تبدیل فوریه زمان کوتاه [۷]، تبدیل موجک [۸] و تبدیل S [۹] اعمال شده است. هدف از فشرده‌سازی همزمان دستیابی به یک نمایش زمان - فرکانس مناسب است که توزیع انرژی پخش شده در صفحه‌ی زمان - فرکانس به موقعیت واقعی زمانی و فرکانسی آن منتقل شود. نمایش‌های زمان - فرکانس در مورد داده‌های لرزه‌ای کاربردهای مختلف پردازشی و تفسیری دارند که می‌توان به نوفه‌زدایی لرزه‌ای [۱۰]، واهمامیخت لرزه‌ای<sup>۲</sup> [۱۱]، آشکارسازی هیدروکربن [۱۲، ۱۳] و آشکارسازی کانال‌ها [۱۳] اشاره کرد. بدیهی است که دستیابی به یک نمایش زمان فرکانس با تفکیک‌پذیری بهتر، نتایج بهتری نیز در این کاربردها به ارمغان می‌آورد. موضوع مورد نظر در این پایان‌نامه استفاده از تبدیل S فشرده شده همزمان<sup>۳</sup> جهت تولید نشانگرها<sup>۴</sup> و استفاده در تفسیر مقاطع لرزه‌ای می‌باشد.

## ۱-۲ سابقه موضوع

تبدیل فوریه ایزاری ریاضی برای ارائه‌ی اطلاعات فرکانسی سیگنال مورد نظر می‌باشد. از طریق استفاده از این تبدیل محتوای فرکانسی سیگنال آشکار می‌گردد، و توزیع انرژی سیگنال در حوزه‌ی فرکانس آشکار خواهد شد. علی‌رغم توانایی تبدیل فوریه و استفاده‌ی وافر از آن در موضوعات مختلف تحلیل سیگنال، این تبدیل قادر نیست که هیچگونه اطلاعاتی در رابطه با توزیع زمانی مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال ارائه دهد. این نقیصه‌ی تبدیل فوریه در رابطه با سیگنال‌های ناپایا، که محتوای فرکانسی متغیر با زمان دارند، بیشتر آشکار می‌شود. برای رفع این نقیصه، گابور<sup>۵</sup> در سال ۱۹۴۶ تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) را معرفی کرد که در آن یک پنجره با پهنای ثابت بر سیگنال ناپایا اعمال می‌شود، و سیگنال را به قسمت‌های مساوی تقسیم کرده، و هر قسمت از سیگنال را پایا در نظر می‌گیرد که با پنجره‌زنی

<sup>۱</sup> Synchrosqueezing Transform

<sup>۴</sup> Attributes

<sup>۲</sup> Seismic Deconvolution

<sup>۵</sup> Gabor

<sup>۳</sup> Synchrosqueezing Stockwell Transform



بر روی سیگنال اصلی و اعمال تبدیل فوریه بر روی هر یک از پنجره‌ها، محتوای فرکانسی حاصله را به مرکز هر پنجره نسبت می‌دهد. با اعمال تبدیل فوق یک نمایش زمانی و فرکانسی به صورت همزمان به دست می‌آید. اما به دلیل اینکه پهنای پنجره ثابت است و با یک پهنای ثابت در طول کل سیگنال اعمال می‌شود، تفکیک فرکانسی و زمانی در طول کل سیگنال یکسان خواهد بود، یعنی برای فرکانس‌های بالا و پایین یک نوع پنجره مورد استفاده قرار می‌گیرد که باعث می‌شود تفکیک فرکانسی و زمانی ضعیفی ارائه دهد و اگر طول پنجره کوچک در نظر گرفته شود، چون پنجره‌زنی در حوزه زمان صورت می‌گیرد تفکیک زمانی خوب و به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ تبدیل فرکانسی ضعیفی خواهد داشت، و همینطور اگر پهنای پنجره بزرگ در نظر گرفته شود، طبق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ تفکیک فرکانسی خوب و تفکیک زمانی ضعیفی خواهد داشت. به منظور رفع نقیصه ثابت بودن پنجره STFT در ادامه تبدیل موجک توسط هار<sup>۱</sup> در سال ۱۹۰۹ ارائه شد [۱۴]. تبدیل موجک از تعدادی توابع به نام موجک (با فرکانس مرکزی متناسب با واریون مقیاس) استفاده می‌کند که هر کدام مقیاس متفاوتی دارند در حالی که یک موجک در لحظه خاصی از زمان واقع شده است این ویژگی به تبدیل موجک اجازه می‌دهد تا علاوه بر اطلاعات فرکانسی، اطلاعات زمانی را نیز به دست آورد در نتیجه سیگنال اصلی را در لحظات مختلف از زمان در موجک دگرهمبستگی<sup>۲</sup> خواهد کرد. در گام نخست، با نقاط ابتدایی سیگنال شروع کرده، و به تدریج موجک را به سمت انتهای سیگنال حرکت می‌دهد، بعد از این که دگرهمبستگی را با سیگنال موجک اصلی انجام داد، آن را به نحوی مقیاس‌دهی می‌کند که بعد از آن که همبستگی موجک با مقیاس مورد نظر با کل سیگنال انجام شد، مقیاس موجک تغییر می‌کند (به سمت مقیاس‌های بزرگتر که معادل است با بازتر شدن موجک) و فرایند مجدداً تکرار می‌شود. نمایش سیگنال اصلی بر حسب مقیاس و زمان است یکی از معایب تبدیل موجک<sup>۳</sup> (WT) تفکیک فرکانسی ضعیف در فرکانس‌های بالا است. در ادامه استاکول<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۶) تبدیل S را معرفی کردند [۳]. در تبدیل S پهنای پنجره

<sup>۱</sup> Alfred Haar

<sup>۲</sup> Crosscorrelation

<sup>۳</sup> Wavelet Transform

<sup>۴</sup> Stockwell

مورد استفاده در فرآیند پنجره زنی ثابت نیست، و پنجره به شکل یک تابع گاوسی<sup>۱</sup> تعریف می‌شود، که پهنای آن به صورت معکوس با فرکانس متناسب است و تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به STFT ارائه می‌دهد. با این وجود نمایش زمان - فرکانس این تبدیل به این دلیل که در فرکانس‌های بالا تفکیک‌پذیری فرکانسی ضعیف و در فرکانس‌های پایین تفکیک‌پذیری زمانی ضعیف وجود دارد از حالت ایده‌آل به دور است. به همین منظور تلاش‌هایی در زمینه ارتقاء تفکیک‌پذیری تبدیل S که بیشتر آن‌ها با موضوع تغییر شکل پنجره یا دخیل کردن پارامترهایی برای افزایش انعطاف پهنای پنجره می‌باشد، صورت گرفت که همگی با عنوان تبدیل S تعمیم یافته<sup>۲</sup> (GST) طبقه‌بندی می‌شوند [۱۵]. اگرچه تلاش‌های دیگری نیز در همین راستا انجام شد که می‌توان به کار رداد و همکاران در سال ۲۰۱۵ اشاره کرد که پهنای پنجره‌ی بهینه‌ای را برای تبدیل S در هر لحظه زمانی و هر مولفه فرکانسی از طریق استفاده از معیارهای تمرکز انرژی و با هدف بیشینه‌سازی تمرکز انرژی پیدا کردند [۱۱].

روش بازچینی<sup>۳</sup> (RM) رهیافت دیگری در همین زمینه است. استفاده از این روش و کاربرد آن در نمایش های زمان فرکانس در ابتدا توسط اوگر و فلاندرین<sup>۴</sup> پیشنهاد شد [۱۶]. رهیافت این تکنیک انتقال انرژی پخش شده در صفحه زمان فرکانس به مختصات واقعی آنها با بهره‌گیری از یک فرآیند بازچینی است. همزمان با معرفی RM، دابیشز و مائس<sup>۵</sup> [۶] شیوه دیگری را که مشابه با RM و بر مبنای فاز بود، توسعه دادند و آن را تبدیل فشرده‌ساز همزمان (SST) نام نهادند. الگوریتم این دو شیوه تا حدود زیادی مشابه با یکدیگر است اما دو تفاوت بارز دارند: اول اینکه فرآیند بازچینی در SST تنها در امتداد فرکانس است، اما در RM در هر دو مسیر زمان و فرکانس انجام می‌شود. تفاوت دوم اینکه بازسازی کامل سیگنال در SST امکان‌پذیر بوده ولی در RM این امکان وجود ندارد.

<sup>۱</sup> Gaussian Window

<sup>۲</sup> Generalized Stockwell Transform

<sup>۳</sup> Reassignment Method

<sup>۴</sup> Auger and Flandrin

<sup>۵</sup> Daubechies and Maus

در زمینه‌ی استفاده از RM و SST در مورد داده‌های لرزه‌ای می‌توان به تحقیقات هررا<sup>۱</sup> و همکاران در زمینه آشکارسازی کانال‌ها [۱۲]، تری<sup>۲</sup> و همکاران در تخمین تضعیف [۱۷]، موسوی و لنگستون<sup>۳</sup> در نوفه‌زدایی لرزه‌ای [۱۸] و چن<sup>۴</sup> و همکاران در اکتشاف هیدروکربن [۱۹] اشاره کرد. همچنین در مورد استفاده از نسخه‌های بازچینی شده<sup>۵</sup> (RM) و فشرده شده همزمان تبدیل S<sup>۶</sup> (SSST) در رابطه با تحلیل زمان - فرکانس داده‌های لرزه‌ای می‌توان به تحقیقات هوانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۲۰] در زمینه آشکارسازی هیدرات‌های گازی و چن و همکاران [۱۹] و ژونگ-لای<sup>۸</sup> و همکاران [۲۱] در زمینه آشکارسازی گاز و رداد و همکاران [۲۲] در زمینه آشکارسازی سایه‌های کم فرکانس اشاره کرد. همانطور که پیش‌تر اشاره شد هر دو تکنیک RM و SST که بر روی نمایش‌های زمان - فرکانس (در اینجا تبدیل S) پیاده‌سازی می‌شوند، قادر هستند که انرژی را در صفحه زمان - فرکانس به میزان بسیار زیادی متمرکز کنند. اما با توجه به اینکه فرآیند بازچینی در RM در هر دو مسیر زمان و فرکانس انجام می‌شود، بنابراین قادر است، تمرکز انرژی بیشتری نسبت به SST که در آن بازچینی تنها در امتداد فرکانس صورت می‌گیرد ارائه دهد اما همانطور که بیان شد [۲۲] RM (و همچنین RST) قادر به بازسازی کامل سیگنال نیست.

در این پایان‌نامه قصد بر این است که عملکرد تبدیل S فشرده شده همزمان بر روی سیگنال‌های لرزه‌ای بررسی شود و به عنوان کاربرد لرزه‌ای تعدادی نشانگر لرزه‌ای از فرایند تحلیل زمان - فرکانس داده‌ها استخراج شده و در زمینه آشکارسازی گاز و سایه‌های فرکانس پایین با استفاده از این تبدیل مطالعه‌ای صورت گیرد.

<sup>۱</sup> Herrera

<sup>۲</sup> Tary

<sup>۳</sup> Mousavi and Langston

<sup>۴</sup> Chen

<sup>۵</sup> Reassigned S-transform

<sup>۶</sup> Synchrosqueezed S-transform

<sup>۷</sup> Huang

<sup>۸</sup> Zhong Lai

## ۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

همواره دستیابی به تفکیک‌پذیری زمان - فرکانس در تحلیل داده‌های لرزه‌ای موضوع مورد علاقه‌ی محققین از دو دهه‌ی گذشته تاکنون بوده است به این خاطر که اگر یک نمایش زمان - فرکانس خوب وجود داشته باشد کاربردهای پردازشی و تفسیری با دقت بالاتری انجام می‌گیرد و همچنین انتظار می‌رود که استفاده از تبدیل S فشرده شده همزمان نتایج مناسبی در این زمینه ارائه دهد.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل تنظیم شده است که فصل اول مقدمه و ضرورت انجام تحقیق را بیان می‌کند در فصل دوم مبانی نظری روش‌های تحلیل زمان - فرکانس ارائه شده است. در فصل سوم به معرفی نشانگرهای لرزه‌ای و مبانی نظری نشانگرهای لرزه‌ای پرداخته می‌شود و در فصل چهارم عملکرد روش پیشنهادی بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی بررسی می‌شود و فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهاد خواهد بود .



## فصل ۲: مبانی نظری روش

## ۲-۱ مقدمه

در این فصل، به معرفی مبانی تئوری تبدیل‌های زمان - فرکانس مانند تبدیل فوری، تبدیل فوری زمان کوتاه، تبدیل S، تبدیل S تعمیم یافته و روش‌های بازچینی RM و فشرده سازی همزمان می‌پردازیم. در این بخش مباحث مربوط به پهنای پنجره در هر تبدیل زمان - فرکانس و مبانی روش بازچینی RM و فشرده سازی همزمان در تبدیل فوری زمان کوتاه بررسی می‌شود و سپس مبانی نظری روش تبدیل S فشرده شده همزمان ارائه خواهد شد.

## ۲-۲ تبدیل فوری

تبدیل فوری یک ابزار ریاضی شناخته شده است که هر سیگنال را از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس منتقل می‌کند. تبدیل فوری سیگنال  $f(t)$  به صورت رابطه (۲-۱) تعریف می‌شود [۲۳].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (۲-۱)$$

و معکوس تبدیل فوری  $F(\omega)$  به صورت رابطه (۲-۲) نوشته خواهد شد:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (۲-۲)$$

به طوری که  $F(\omega)$  تبدیل فوری  $f(t)$  نام دارد. تبدیل فوری تابع  $f(t)$  را می‌توان به صورت ضرب داخلی تابع با تابع پایه  $e^{j\omega t}$  در نظر گرفت.

$$F(\omega) = (f(t), e^{j\omega t}) \quad (۳-۲)$$

$f(t)$  را می‌توان بر حسب مجموع سینوس‌ها و کسینوس‌ها نیز نوشت.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega t + b_n \sin \omega t), \quad (۴-۲)$$

که در آن  $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  دامنه و  $\theta_n = \tan^{-1} \left( -\frac{b_n}{a_n} \right)$  فاز است.

همچنین عبارت نمایی در معادله (۲-۱) را می‌توان به صورت  $\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$  نوشت که دارای یک قسمت حقیقی از فرکانس  $\omega$  و یک قسمت موهومی از سینوس فرکانس  $\omega$  است و در عمل سیگنال در یک عبارت مختلط که شامل سینوس و کسینوس است ضرب می‌شود و سپس این حاصل ضرب‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند. اگر تبدیل فوریه دارای مقدار باشد فرکانس غالب در سیگنال  $\omega$  خواهد بود و اگر تبدیل فوریه در آن صفر شود یعنی سیگنال دارای فرکانس  $\omega$  نیست. اطلاعات ارائه شده مربوط به سیگنال از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت را شامل می‌شود یعنی در هر زمانی که فرکانس اتفاق افتاده باشد تاثیر یکسانی در حاصل جمع خواهد داشت و به همین دلیل در مورد سیگنال‌های ناپایا که محتوی فرکانسی متغیر با زمان دارند اطلاعاتی از زمان وقوع فرکانس ارائه نخواهد داد. با توجه به این که تبدیل فوریه عملکرد قابل قبولی در مورد سیگنال‌های ناپایا نداشت در ادامه تبدیل فوریه زمان کوتاه ارائه گردید.

## ۲-۳ تبدیل فوریه زمان کوتاه

برای اولین بار فیزیکدانی به نام گابور [۱] در سال ۱۹۴۶ با معرفی تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه اولین قدم را برای نمایش زمان - فرکانس سیگنال‌های ناپایا برداشت و به این نتیجه رسید که می‌توان بخش کوچکی از یک سیگنال ناپایا را پایا فرض کرد به این صورت که پنجره‌ای با پهنای ثابت بر روی سیگنال اعمال می‌شود.

می‌توان تبدیل زمان کوتاه (STFT) یک سیگنال را به صورت معادله (۲-۵) نوشت:

$$STFT_f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} g(t - \tau) dt \quad (2-5)$$

و معکوس تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) سیگنال به صورت معادله (۲-۶) خواهد بود:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_f(\tau, \omega) e^{j\omega t} g(t - \tau) d\omega d\tau \quad (2-6)$$



که در روابط فوق  $g(t)$  یک پنجره متقارن است که بر حسب تاخیر  $\tau$  در راستای زمان جابه‌جا شده است و بر حسب فرکانس  $\omega$  مدوله می‌شود.

قدرت تفکیک این تبدیل زمان - فرکانس خطی در راستای محورهای زمان و فرکانس به گسترش تابع پنجره در راستای این محورها بستگی دارد هر چه پنجره زمانی بزرگتر باشد، قدرت تفکیک فرکانسی بالاتر و قدرت تفکیک زمانی کمتر است و برعکس. ولی این قدرت تفکیک فرکانسی، در تمام صفحه زمان - فرکانس یکسان است به عبارتی دیگر تمام فرکانس‌های بالا و پایین با یک پنجره ثابت بررسی می‌شوند و این در واقع یکی از معایب این تبدیل است. مشکلی که در STFT وجود دارد مربوط به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است که این اصل به اندازه حرکت ذرات و مکان ذرات در حال حرکت مرتبط است در واقع طبق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ نمی‌توان نمایش دقیق و همزمانی از زمان و فرکانس یک سیگنال به طور همزمان به دست آورد و در واقع همیشه یک باند زمانی و باند فرکانسی وجود خواهد داشت و همین مساله از معایب تبدیل STFT می‌باشد.

## ۲-۳-۱ تفکیک پذیری شکل و پهنای پنجره

آنچه در تفکیک‌پذیری نمایش‌های زمان - فرکانس بر پایه‌ی فوریه تأثیرگذار است، شکل و پهنای پنجره می‌باشد. توازن بین تفکیک‌پذیری زمانی و تفکیک‌پذیری فرکانسی همواره یک موضوع چالش برانگیز بوده است. پهنای پنجره از طرفی باید به اندازه‌ای کوچک باشد که تفکیک‌پذیری زمانی قابل قبول باشد از طرف دیگر برای تخمین اطلاعات یک موج نوسانی حداقل یک دوره تناوب کامل از موج مورد نیاز است و بنابراین پنجره باید حداقل یک دوره تناوب از نوسانات سیگنال را پوشش دهد، پس برای تشخیص فرکانس‌های پایین به پنجره‌های پهن‌تر نیاز است و پنجره‌های باریک‌تر برای تشخیص فرکانس‌های بالاتر مورد نیاز است. پنجره هر شکل و تابعی مانند توابع همینگ<sup>۱</sup>، هنینگ<sup>۲</sup>، مستطیلی، بارتلت<sup>۳</sup> و غیره می

---

<sup>۱</sup> Hamming

<sup>۲</sup> Hanning

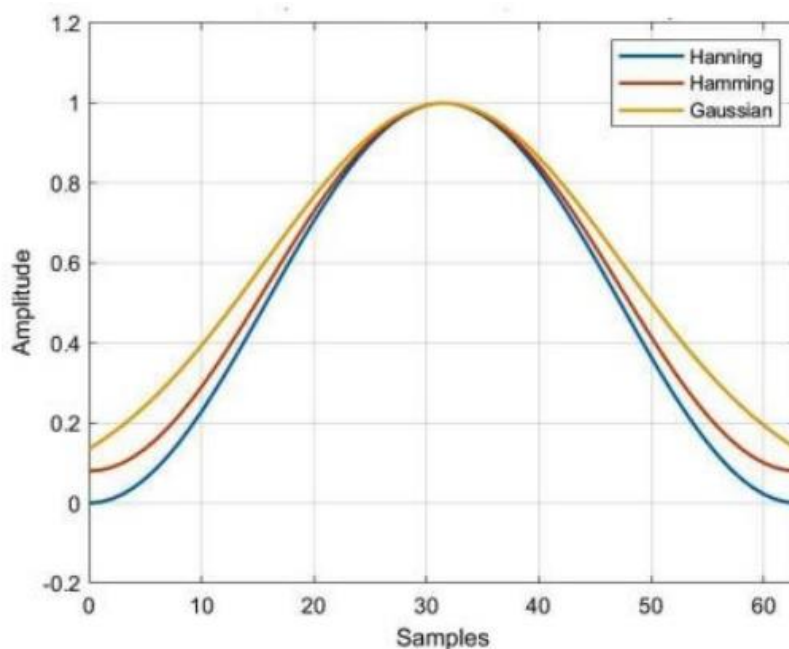
<sup>۳</sup> Bartlett

تواند داشته باشد. یکی از توابع مرسوم پنجره که در پردازش سیگنال استفاده می شود، تابع گاوسی است که به صورت رابطه (۷-۲) تعریف می شود:

$$\omega_{\sigma}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (۷-۲)$$

در رابطه (۷-۲)  $\sigma$  هم قیاس با انحراف استاندارد<sup>۱</sup> در علم آمار، نشان دهنده ی پهنای پنجره است، به این ترتیب که با افزایش آن پهنای پنجره افزایش می یابد.

در شکل ۱-۲ تفاوت پنجره های همینگ، هنینگ و گاوسین را مشاهده می کنیم [۲۴]:



شکل ۱-۲: مقایسه تفاوت سه پنجره همینگ، هنینگ و گاوسین

با در نظر گرفتن پنجره گاوسی تبدیل فوریه زمان کوتاه با پهنای پنجره ثابت  $\sigma_c$  به صورت رابطه (۹-۲) خواهد بود و بنابراین رابطه ی (۵-۲) به صورت رابطه ی (۹-۲) نوشته خواهد شد:

$$TFR(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \omega_{\sigma}(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \quad (۸-۲)$$

<sup>۱</sup> Standard Deviation

$$STFT(\tau, \omega) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma_c^2}} e^{-j\omega t} dt \quad (9-2)$$

در تبدیل STFT پنجره دارای عرض محدود است و فقط قسمتی از سیگنال را پوشش می‌دهد که این امر باعث می‌شود تفکیک‌پذیری فرکانسی پایینی را ایجاد نماید و به جای به دست آوردن دقیق اجزای فرکانسی، فقط می‌توان باندی از فرکانس را بدست آورد. و اگر طول پنجره بی‌نهایت در نظر گرفته شود تا فرکانس به صورت دقیق‌تری اندازه‌گیری شود، اطلاعات زمانی در دسترس نخواهد بود. به طور کلی تبدیل STFT به دلیل اصل عدم قطعیت هاینبرگ توانایی تفکیک‌پذیری دقیق زمانی و فرکانسی به صورت همزمان را نخواهد داشت.

## ۲-۴ تبدیل S

طبق تعریف تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه (STFT) پنجره‌زنی در حوزه‌ی زمان صورت می‌گیرد و همچنین اندازه‌ی پنجره برای تمام مولفه‌های فرکانسی دارای انحراف استاندارد و پهنای یکسان و ثابت است.

همانطور که گفته شد انحراف استاندارد و یا پهنای پنجره، برای تمام لحظات زمانی و یا برای تمام مولفه‌های فرکانسی ثابت است که منجر به تفکیک‌پذیری ثابت و به دور از ایده‌آل خواهد شد. استاکول و همکاران [۳] تبدیل S را پیشنهاد کردند که در آن انحراف استاندارد پنجره متغیر و وابسته به فرکانس

از طریق رابطه‌ی  $\sigma(f) = \frac{1}{|f|}$  می‌باشد. بدین تربیت نمایش زمان - فرکانس برای تبدیل S استاندارد

از رابطه (۱۰-۲) حاصل می‌شود :

$$ST(\tau, \omega) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j\omega t} dt \quad (10-2)$$

که در رابطه (۱۰-۲)  $f$  فرکانس می‌باشد. عمل پنجره‌زنی در حوزه فرکانس اعمال می‌شود زیرا تابع پنجره‌ی ما تابعی از فرکانس است و در حوزه‌ی زمان اطلاعاتی از فرکانس سیگنال در اختیار نداریم و

همچنین جهت برخورداری از سرعت تبدیل فوریه سریع و با استفاده از خصوصیت نظریه‌ی همامیخت<sup>۱</sup>،

تبدیل S را می‌توان به عنوان همامیختی از دو تابع روی متغیر t تعریف کرد:

$$ST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t, f) w(\tau - t, f) dt = p(\tau, f) * w(\tau, f) \quad (۱۱-۲)$$

در رابطه (۱۱-۲)،  $p(\tau, f)$  و  $w(\tau, f)$  عبارتند از:

$$p(\tau, f) = y(\tau) e^{i 2\pi f \tau} \quad (۱۲-۲)$$

$$w(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2}} \quad (۱۳-۲)$$

اگر  $\widehat{ST}(f', f)$  تبدیل فوریه‌ی (از  $\tau$  به  $f'$ ) از  $ST(\tau, f)$  باشد از نظریه‌ی همامیخت، همامیخت در حوزه‌ی  $\tau$  (زمان)، به صورت حاصلضرب در حوزه‌ی  $f'$  (فرکانس) تعریف می‌شود:

$$\widehat{ST}(f', f) = \widehat{p}(f', f) \widehat{w}(f', f) \quad (۱۴-۲)$$

که در رابطه (۱۴-۲)،  $\widehat{p}(f', f)$  و  $\widehat{w}(f', f)$  تبدیل فوریه‌ی  $p(\tau, f)$  و  $w(\tau, f)$  هستند و بنابراین:

$$\widehat{ST}(f', f) = \widehat{y}(f' + f) e^{-\frac{2\pi^2 f'^2}{f^2}} \quad (۱۵-۲)$$

که  $\widehat{y}(f' + f)$  و عبارت نمایی، تبدیل فوریه‌ی روابط بیان شده در (۱۲-۲) و (۱۳-۲) هستند. بنابراین تبدیل S تبدیل فوریه‌ی معکوس (از  $f'$  به  $\tau$ ) می‌باشد:

$$ST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{y}(f' + f) e^{-\frac{2\pi^2 f'^2}{f^2}} e^{-i 2\pi f' \tau} df' \quad (۱۶-۲)$$

با توجه به اینکه پهنای پنجره با فرکانس رابطه‌ی معکوس دارد به همین دلیل برای مولفه‌هایی با فرکانس‌های بالا، پنجره‌ای با پهنای کم و برای مولفه‌هایی با فرکانس‌های پایین، پنجره‌ای با پهنای

---

<sup>۱</sup> Convolution

بزرگتر را در نظر می‌گیرد که در نهایت تفکیک‌پذیری بهتری نسبت به STFT خواهد داشت این امر به دلیل متغیر بودن پهنای پنجره در ST نسبت به STFT می‌باشد. تبدیل S از یک پنجره‌ی گوسی که پهنای آن به صورت معکوس با فرکانس تغییر می‌کند و تفکیک‌پذیری بهتری را نسبت به STFT ارائه می‌دهد اما هنوز ضعف در ارائه‌ی تفکیک‌پذیری مطلوب در همه مولفه‌های فرکانسی را خواهد داشت که تفکیک‌پذیری زمانی پایین در فرکانس‌های پایین و تفکیک‌پذیری فرکانسی پایین در فرکانس‌های بالا از مشکلاتی است که تبدیل S با آن روبه‌رو است و از این رو نسخه‌های دیگری از تبدیل S مانند تبدیل S تعمیم یافته (GST) به وجود آمدند.

## ۲-۵ تبدیل S تعمیم یافته (GST)

در تبدیل S تعمیم یافته که در ابتدا توسط مک‌فادن<sup>۱</sup> و همکاران [۲۵] در سال ۱۹۹۹ و بعد از آن پینگار و مانسینها<sup>۲</sup> [۱۵] در سال ۲۰۰۳ ارائه شد، تصحیحاتی بر روی پنجره اعمال گردید و بدیهی بود که برای افزایش تفکیک فرکانسی و زمانی تصحیحات باید بر روی پنجره اعمال گردد. بر خلاف تبدیل S که یک رابطه پارامتری بصورت  $\sigma(f) = \frac{1}{f}$  بین فرکانس و پهنای پنجره برقرار است در تبدیل S تعمیم یافته یک رابطه پارامتری بین پهنای پنجره و فرکانس به صورت  $\sigma(f, p)$  برقرار است که p می‌تواند به صورت مجموعه‌ای از پارامترها باشد که در تعیین اندازه‌ی پهنای پنجره لحاظ خواهد شد. و اگر یک تابع پنجره با پارامترهای بهینه تولید شود، می‌تواند در ایجاد یک تفکیک فرکانسی و زمانی خوب بسیار مفید باشد.

تبدیل S تعمیم یافته به صورت رابطه (۲-۱۷) تعریف می‌شود:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) w(\tau - t, f, p) e^{-i 2\pi f t} dt \quad (2-17)$$

<sup>۱</sup> McFadden

<sup>۲</sup> Pinnegar and Mansinha

پارامتر  $p$  مجموعه‌ای از پارامترهاست که شکل و ویژگی‌های پنجره‌ی  $w(t)$  را تعیین می‌کند. تابع پنجره  $w(t)$  برای تبدیل  $S$  تعمیم یافته به صورت رابطه (۱۸-۲) نوشته خواهد شد:

$$w(\tau, f, p) = \frac{|f|^p}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^{2p}}{2}} \quad (18-2)$$

و پنجره‌ی  $w(t)$  باید طبق رابطه (۱۹-۲) شرط واحد را افراز نماید :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} w(\tau, f, p) = 1 \quad (19-2)$$

در ادامه با پیدا کردن، بهترین مقدار برای  $p$  می‌توان به تفکیک زمان فرکانس بهتری دست پیدا کرد که در این زمینه تلاش‌هایی صورت گرفته است .

استانکوویچ<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۱، مقدار بهینه‌ی  $p$  را براساس اندازه‌گیری تمرکز بیشینه‌ی انرژی به‌دست آورد این اندازه‌گیری به صورت فرمول (۲۰-۲) انجام گرفت:

$$CM(P) = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |S_x^p(t, f)| dt df} \quad (20-2)$$

که  $CM$ ، معیاری برای اندازه‌گیری تمرکز انرژی است [۲۶].

در ادامه سیدیچ<sup>۲</sup> و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۰۸، رابطه‌ی بین پهنای پنجره و فرکانس را بصورت رابطه (۲۱-۲) نشان دادند که در آن پارامتر  $p$  بهینه شده است :

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|^p} \quad (21-2)$$

ساهو<sup>۳</sup> و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۰۹ نیز، با اصلاحاتی که بر روی پنجره انجام دادند، یک پنجره‌ی گوسی اصلاح شده را پیشنهاد نمودند که رابطه‌ی آن با پهنای پنجره به صورت زیر خواهد بود :

---

<sup>۱</sup> Stanković

<sup>۲</sup> Sejdić

<sup>۳</sup> Sahu

$$\sigma(f) = \frac{\sigma}{|f|} \quad (22-2)$$

در روش ساهو و همکاران تابع پنجره همان تابع گوسی باقی می ماند، زیرا تابع گوسی کمترین میزان عدم قطعیت را خواهد داشت. بنابراین تبدیل S تعمیم یافته به صورت رابطه (23-2) خواهد بود:

$$S_x(\tau, f, \delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2\delta^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (23-2)$$

$$w(t, f, \delta) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2\delta^2}} \quad (24-2)$$

پنجره گوسی در حوضه فرکانس به صورت رابطه (25-2) می باشد :

$$W(\alpha, f, \delta) = e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2 \delta^2}{f^2}} \quad (25-2)$$

که در رابطه (25-2) پارامتر  $\alpha$  برحسب فرکانس است.

در تحقیقی دیگر تودوروف<sup>۱</sup> و مارگریو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹، روشی دیگر از GST را ارائه نمودند که پهنای

پنجره با فرکانس به صورت رابطه  $\sigma(f, k) = \frac{k(f)}{|f|}$  تغییر می کند که در آن  $k \in [1:6]$  به طوری که

برای فرکانس های پایین  $k=1$  و برای فرکانس های بالا  $k=6$  در نظر گرفته شده است و با یک

درون یابی خطی مقدار  $k$  را برای دیگر فرکانس ها تعیین می کند. وجود پارامتر  $k$  که وابسته به

فرکانس است در فرکانس های بالا ایجاد پهنای پنجره می کند به طوری که پهنای پنجره در GST در

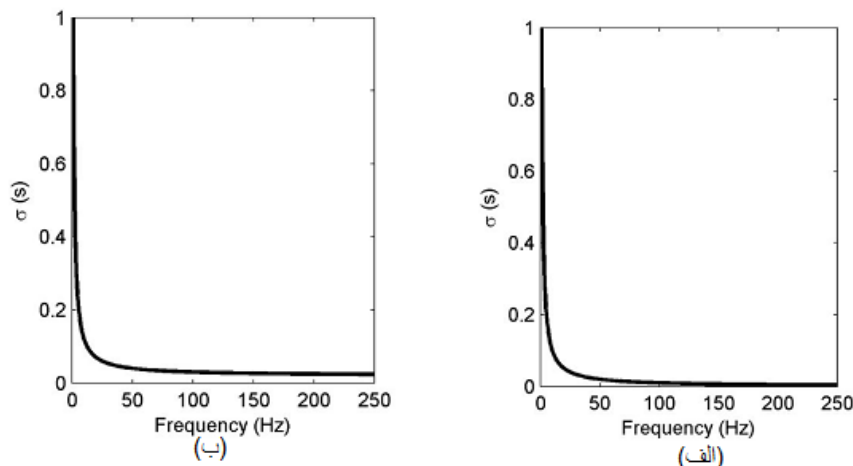
فرکانس های بالا بیشتر از ST خواهد بود [۲۹].

در شکل ۲-۲ پهنای پنجره در این روش، با پهنای پنجره ی گوسین در تبدیل S مقایسه شده است

[۳۰]:

<sup>۱</sup> Todorov

<sup>۲</sup> Margrave



شکل ۲-۲: (الف) پهنای پنجره در تبدیل S (ب) پهنای پنجره در تبدیل GST [۳۰].

## ۲-۶ روش بازچینی

در اواخر دهه ۷۰ میلادی کاندرا و گندرین<sup>۱</sup> رویکردی با هدف اصلاح و روش پنجره‌ی متحرک را در پیش گرفتند [۳۱]. مطالعات آن‌ها نشان می‌داد که هنگام استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) مقدار این تبدیل هنگام نمایش گرافیکی دچار پخش‌شدگی می‌شود که با در نظر گرفتن اطلاعات فازی می‌توان آن را جبران کرد. این پیشنهاد می‌توانست باعث پیشرفت زیادی در این زمینه شود اما به دلیل اینکه کارایی آن به صورت تئوری اثبات نشده بود و به دلیل مشکلات پیاده سازی مورد توجه واقع نشد. اوگر و فلاندرین<sup>۲</sup> در اوایل دهه ۹۰ اعلام کردند که استفاده از فاز در تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) می‌تواند با یک پنجره‌ی مناسب ترکیب شود [۱۶] و آن‌ها این روش را بازچینی (RM) نامیدند. روش بازچینی برای اولین بار به عنوان ابزاری برای بهبود نمایش‌های زمان - فرکانس معرفی شد [۳۲]. از نظر پردازشی می‌توان این روش را یک روش پسا پردازشی در نظر گرفت. این نقطه‌ی آغازین استفاده از این روش در حوزه‌های جدیدی مانند صدا [۳۴] و فیزیک [۳۵] شد.

<sup>۱</sup> Kodera and Gendrin

<sup>۲</sup> Auger and Flandrin



در حالی که در تبدیل STFT انرژی سیگنال در صفحه زمان - فرکانس که یک پنجره ثابت بر آن اعمال شده است دچار پخش شدگی می شود در روش بازچینی (RM) انرژی پخش شده در صفحه زمان - فرکانس در تبدیل STFT را به مرکز ثقل انرژی منتقل می کند. به طور کلی، بازچینی زمان - فرکانس تبدیل STFT با استفاده از اطلاعات طیف فاز، انرژی پخش شده در صفحه زمان - فرکانس را متمرکز می کند. متأسفانه، این اطلاعات فاز که برای بازچینی استفاده شده است در بازسازی سیگنال در دسترس نخواهد بود و به همین دلیل بازسازی سیگنال در روش بازچینی امکان پذیر نخواهد بود [۳۳].

سیگنال داده شده ی  $f \in L^1(\mathbb{R})$  که در آن  $g$  پنجره ای است که بر سیگنال اعمال می شود و تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) بر روی سیگنال  $f$  به صورت رابطه (۲۶-۲) نشان داده می شود [۳۱]:

$$V_f^g(t, \omega) = \int_{\mathbb{R}} f(\tau) g^*(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (26-2)$$

که در رابطه (۲۶-۲)  $g^*(t)$  مزدوج مختلط تابع  $g(t)$  است. طیف نمای  $S_f^g(t, \omega)$  به صورت  $|V_f^g(t, \omega)|^2$  تعریف می شود. پنجره ی گوسین نیز به صورت رابطه (۲۷-۲) نشان داده شده است:

$$g = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (27-2)$$

سیگنال چند مولفه ای  $f$  را در غالب تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) به صورت رابطه (۲۸-۲) تعریف می کنیم:

$$f(t) = \sum_{k=1}^k \alpha_k(t) e^{i\phi_k(t)} \quad (28-2)$$

یک نمایش زمان فرکانس ایده آل برای سیگنال  $f$  به صورت رابطه (۲۹-۲) تعریف می شود [۳۱]:

$$ITF_q(t, \omega) = \sum_{k=1}^N \alpha_k(t)^q \delta(\omega - \phi'_k(t)) \quad (29-2)$$

در رابطه (۲۹-۲)  $\delta$  تابع دلتای کرونکر<sup>۱</sup> خواهد بود و همچنین  $q$  در آن یک عدد صحیح و مثبت است که به نوع توزیع زمان - فرکانس بستگی دارد و اگر  $q = 1$  در نظر گرفته شود به یک تبدیل STFT مبدل خواهد شد و اگر  $q = 2$  باشد تبدیل به یک طیفنما خواهد شد و همچنین  $\phi'_k(t)$  یک فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای  $k$  امین حالت در زمان  $t$  خواهد بود.

مهمترین مسئله در تجزیه و تحلیل زمان فرکانس سیگنال اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است که طبق این اصل نمی‌توان سیگنال را با دقت دلخواه زمانی و فرکانسی به صورت همزمان مشخص کرد. نمایش زمان فرکانس اغلب شامل پارامترهایی برای ایجاد تعادل بین وضوح فرکانسی و محلی سازی زمان است. براساس معادله (۲۶-۲) که تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه سیگنال  $f$  است، طیفنمای سیگنال  $f$  به صورت رابطه (۳۰-۲) نوشته می‌شود:

$$S_f^g(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \iint_R W_g(\tau - t, \nu - \omega) W_f(\tau, \nu) d\tau d\nu \quad (30-2)$$

$W_f(t, \omega)$  توزیع ویگنرویل سیگنال است که به صورت رابطه (۳۱-۲) می‌باشد:

$$W_f(t, \omega) = \int_R f(t + \tau/2) f^*(t - \tau/2) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (31-2)$$

معادله (۳۰-۲) مقدار طیفنما در  $(t, \omega)$  برابر است با مجموع تمام توزیع ویگنرویل سیگنال در حوزه‌ی زمان - فرکانس، که توزیع ویگنرویل پنجره در آن صفر نباشد. در زیر روش بازچینی (RM) بروی طیفنما برای جبران کردن جابه‌جایی‌های زمان - فرکانس در طیفنما که ناشی از هموارسازی دو بعدی است، نشان داده شده است. برای این کار یک مکان زمانی و فرکانسی برای مشخص کردن نقطه‌ای که انرژی به آن تصویر می‌شود توسط طیفنما مشخص می‌شود.

برای به دست آوردن مقدار  $(\hat{t}_f, \hat{\omega}_f)$  از عملگرهای زیر استفاده می‌کنیم [۱۶]:

---

<sup>۱</sup> Kronecker Delta Function

$$\hat{\omega}_f(t, \omega) = \omega - \Im \left\{ \frac{V_f^{g'}(t, \omega)}{V_f^g(t, \omega)} \right\} \quad (32-2)$$

$$\hat{t}_f(t, \omega) = t + \Re \left\{ \frac{V_f^{tg}(t, \omega)}{V_f^g(t, \omega)} \right\} \quad (33-2)$$

در رابطه (32-2) و (33-2)،  $tg$  همان تابع  $tg(t)$  است و  $\Re\{Z\}$  بیانگر قسمت حقیقی عبارت داخل کروشه در رابطه (33-2) می باشد و  $\Im\{Z\}$  بیانگر قسمت موهومی عبارت داخل کروشه در رابطه (32-2) می باشد.

که در نتیجه‌ی آن روش بازچینی (RM) مقدار محاسبه شده‌ی طیف نما را به مکانی که در معادله (34-2) مشخص می شود منتقل می نماید:

$$S_f^g(t, \omega) = \iint_{R^2} S_f^g(t, \nu) \delta(\omega - \hat{\omega}_f(\tau, \nu)) \delta(t - \hat{t}_f(\tau, \nu)) d\tau d\nu \quad (34-2)$$

که در رابطه (34-2)،  $\delta$  تابع دلتای دیراک<sup>۱</sup> است.

## ۷-۲ تبدیل فوریه زمان کوتاه فشرده شده همزمان

روش فشرده سازی همزمان (SST) که توسط دابیشز و مائس [۶] ارائه شد، توانایی بالایی در بالابردن تفکیک زمانی و فرکانسی به اندازه روش بازچینی (RM) داشت با این تفاوت که قابلیت بازسازی سیگنال را نیز دارد. نتایج اخیر نشان می دهد که فشرده سازی همزمان (SST) تقریب خوبی از نمایش زمان فرکانس ایده آل سیگنال به دست می دهد.

برخلاف روش بازچینی (RM) که با طیف نمای سیگنال تعریف می شود روش فشرده سازی همزمان (SST) به صورت مستقیم با تبدیل STFT تعریف می شود. ساختار روش فشرده سازی همزمان (SST) بر پایه فرمول (35-2) است:

---

<sup>۱</sup> Dirak Delta Function

$$f(t) = \frac{1}{2\pi g(0)^*} \int_R V_f^g(t, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (35-2)$$

که معادله (35-2) مجموع تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) در فرکانس در هر زمان  $(t)$  می باشد. اگرچه وقتی  $f$  از مولفه های جدا  $f_k$  در صفحه زمان - فرکانس تشکیل شده باشد قسمت اصلی از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)  $f_k$ ، در نزدیکی لبه  $(\phi'(k), t)$  قرار می گیرد. براین اساس عملگر فشرده سازی بر روی تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت معادله (36-2) تشریح می شود:

$$T_f^g(t, \omega) = \frac{1}{2\pi g(0)^*} \int_R V_f^g(t, \omega) e^{i\omega t} \delta(\omega - \hat{\omega}_f(t, v)) dv \quad (36-2)$$

در معادله (36-2)  $\omega$  فرکانس زاویه ای می باشد [34]. باید به این نکته توجه کرد که این عبارت بسیار شبیه به آنچه که در بازچینی (RM) انجام شده است، می باشد اما در اینجا بازچینی در راستای زمان انجام نمی گیرد و از  $V_f^g$  که تبدیل فوریه زمان کوتاه می باشد به جای طیف نما استفاده می شود.

اکنون که عملگر فشرده سازی  $T_f^g$  محاسبه شد، می توان با انتگرال گرفتن از  $T_f^g$  مقدار  $k$  امین حالت را در نزدیکی لبه ها بازسازی کرد:

$$f_k(t) \approx \int_{\{\omega, |\omega - \phi'_k(t)| < d\}} T_f^g(t, \omega) d\omega \quad (37-2)$$

معادله (37-2) برای پارامترهای کوچک  $d$  برقرار است. و به این دلیل که  $\phi'_k(t)$  مجهول است، لازم است که در عمل این میانگین محلی از  $T_f^g$  در فرکانس که زمان  $(t)$  در آن ثابت است تخمین زده شود که به خوبی  $f_k$  را بازسازی کند.

با داشتن  $T_f^g$  و با فرض دانستن مولفه های  $k$ ، یک روش استخراج لبه می تواند مقدار  $\phi'_k$  را قبل از انجام بازیابی حالت بدست آورد. برای این کار روش های زیادی وجود دارد [35]، اما همه ی آنها بر پایه ی روش استخراج لبه که با روش فشرده سازی سازگاری دارد بنا شده اند.

## ۸-۲ تئوری روش تبدیل S فشرده شده همزمان

روش تبدیل فوری‌ی زمان کوتاه فشرده شده را در بخش قبل توضیح دادیم و اکنون این روش را بر روی تبدیل S سیگنال  $x(t)$  اجرا کرده و به صورت زیر بیان می‌کنیم [۲۰]، رابطه (۳۸-۲) تبدیل S سیگنال را نشان می‌دهد:

$$ST_x(f, b) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g(t-b, f) e^{-i 2\pi f t} dt \quad (38-2)$$

که در معادله (۳۸-۲)،  $g(t-b, f) = e^{\frac{-(t-b)^2 f^2}{2}}$  پنجره گوسی به صورت تابعی از فرکانس  $f$  و زمان

$t$  است که به اندازه‌ی  $b$  در راستای زمان انتقال یافته است. با در نظر گرفتن معادله (۳۸-۲) و اعمال

پنجره  $g(t-b, f)$  بر آن، معادله (۳۸-۲) را به صورت معادله (۳۹-۲) گسترش می‌دهیم:

$$ST_x(f, b) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{\frac{-(t-b)^2 f^2}{2}} e^{-i 2\pi f t} dt \quad (39-2)$$

در رابطه (۳۹-۲) و پس از یکسری عملیات ریاضی و جداسازی متغیرها می‌توان

$\psi(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) e^{\frac{-t^2}{2}} e^{i 2\pi t}$  را به اینصورت در نظر گرفت که معادله (۳۹-۲) به صورت معادله (۴۰-۲)

نوشته خواهد شد:

$$ST_x(f, b) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{\frac{-(t-b)^2 f^2}{2}} e^{-i 2\pi f (t-b)} e^{-i 2\pi f b} dt \quad (40-2)$$

$$ST_x(f, b) = |f| e^{-i 2\pi f b} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi[f(t-b)]} dt \quad (41-2)$$

که در معادله (۴۱-۲)  $\overline{\psi}$  مزدوج مختلط  $\psi$  است. بر طبق نظریه‌ی پلانچرل<sup>۱</sup> رابطه (۴۱-۲) را به

صورت معادله (۴۲-۲) نیز می‌توان بازنویسی کرد:

<sup>۱</sup> Plancherel Theorem

$$ST_x(f, b) = \frac{1}{2\pi} e^{-i2\pi fb} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(\xi) \overline{\hat{\psi}(f^{-1}\xi)} e^{ib\xi} d\xi \quad (42-2)$$

که  $\xi$  فرکانس،  $\hat{x}(\xi)$  تبدیل فوریه سیگنال  $x(t)$  و  $\hat{\psi}(\xi)$  تبدیل فوریه  $\psi(t)$  است. بر این مبنا می‌توان بازسازی سیگنال حاصل از تبدیل  $S$  را از رابطه (43-2) انجام داد:

$$x(b) = \text{Re} \left[ C_{\psi}^{-1} \int_0^{\infty} ST_x(f, b) e^{i2\pi fb} f^{-1} df \right] \quad (43-2)$$

که  $C_{\psi} = 0.5 \int_0^{\infty} -\overline{\hat{\psi}(\xi)} \xi^{-1} d\xi$ . هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۰]، از طریق ایجاد یک فرمولاسیون

ویژه نسخه فشرده‌شده همزمانی از تبدیل  $S$  را ارائه کردند. آنها نشان دادند که فرکانس لحظه‌ای در یک طیف زمان - فرکانس حاصل از تبدیل  $S$  از رابطه‌ی (44-2) بدست می‌آید:

$$\tilde{f}(f, b) = f + [i2\pi ST_x(f, b)]^{-1} \frac{\partial}{\partial b} [ST_x(f, b)] \quad (44-2)$$

که بر مبنای آن تبدیل  $S$  فشرده‌شده‌ی همزمان سیگنال  $x(t)$ ، به صورت  $SSST_x(\tilde{f}, b)$  در رابطه

(45-2) تعریف شده است:

$$SSST_x(\tilde{f}_l, b) = (\Delta \tilde{f})^{-1} \sum_{f_k: |\tilde{f}(f_k, b) - \tilde{f}_l| \leq \frac{\Delta \tilde{f}}{2}} |ST_x(f_k, b)| f_k \Delta f_k \quad (45-2)$$

که  $f_k$  فرکانس گسسته سیگنال در طی فرآیند محاسبه‌ی تبدیل  $S$  است و  $\Delta f_k = f_k - f_{k-1}$  و  $\tilde{f}_l$  و

$\Delta \tilde{f}$  به ترتیب فرکانس مرکزی و بازه فرکانسی طیف فشرده شده است به طوری که  $\Delta \tilde{f}_l = \tilde{f}_l - \tilde{f}_{l-1}$

. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که بازسازی تبدیل  $S$  فشرده شده همزمان بطور کامل از

رابطه (46-2) امکان پذیر است:

$$x(b) = \text{Re} \left[ (c_{\psi} c_{\varphi})^{-1} \sum_l SSST_x(\tilde{f}_l, b) \Delta \tilde{f}_l \right] \quad (46-2)$$

که اگر نمایش زمان فرکانس حاصل از تبدیل  $S$  را بصورت  $ST_x(f, b) = |ST_x(f, b)| e^{i\varphi(f, b)}$  داشته باشیم،  $C_\varphi = e^{-i[2\pi fb + \varphi(f, b)]} f^2$  خواهد بود. در فصل چهارم عملکرد روش تبدیل  $S$  فشرده شده همزمان در ارائه نمایش زمان - فرکانس چند سیگنال مصنوعی بررسی خواهد شد. ضمناً مقایسه‌ای با عملکرد تبدیل  $S$  استاندارد نیز ارائه می شود.

## فصل ۳: نشانگرهای لرزه‌ای



### ۳-۱ مقدمه

در این فصل توضیحاتی در مورد نشانگرهای زمان - فرکانس و تاثیر تبدیل‌ها بر نشانگرها ارائه خواهد شد. تبدیل‌های زمان - فرکانس به همان نسبت که تفکیک زمانی و فرکانسی دقیق‌تری ارائه می‌دهند در نتیجه نشانگرها تفسیر بهتر و قابل قبول‌تری خواهند داشت و سعی همیشه بر این خواهد بود که با استفاده از تبدیل مناسب به تفکیک زمانی و فرکانسی مطلوب‌تری از ساختار زمین شناسی برسیم و با استفاده از نشانگرهای مختلف تفسیر بهتری ارائه داده شود. نشانگرهای متنوعی با کاربردهای مختلف در تفسیر اطلاعات لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال کارایی آنها در اکتشافات نفت و گاز و بررسی‌های چینه‌شناسی باید مورد توجه قرار گیرد. اکنون صدها نشانگر لرزه‌ای با استفاده از رویکردهای مختلف برای چنین اهدافی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شماری از آنها که شامل رویکردهای آماری [۳۷]، تجزیه و تحلیل ردلرزه پیچیده [۳۸]، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی<sup>۱</sup> (PCA) [۳۹]، تجزیه و تحلیل همبستگی [۴۰]، رویکردهای شناسایی الگو و تکنیک‌های تجزیه طیفی [۴۱] هستند. نشانگرهای زمان - فرکانس، نشانگرهای لرزه‌ای کارآمد با کاربردهای گوناگون هستند که اطلاعات مهم داده‌های لرزه‌ای را به نمایش می‌گذارند و کارایی این نشانگرها تحت تأثیر دقت تحلیل زمان - فرکانس است. نشانگرهای لرزه‌ای از معادلات ریاضی و انواع مختلف تبدیلات برای آشکار کردن اطلاعات پنهان از داده‌های لرزه‌ای و نمایش انواع اطلاعات ساختاری و چینه‌ای از ساختار زمین استفاده می‌کنند. نشانگرهای مورد نظر عبارتند از دامنه لحظه‌ای<sup>۲</sup>، فرکانس لحظه‌ای غالب<sup>۳</sup>، فاکتور شیرینی<sup>۴</sup>، متوسط

---

<sup>۱</sup> Principal Component Analysis

<sup>۲</sup> Instantaneous Amplitude

<sup>۳</sup> Instantaneous Peak Frequency

<sup>۴</sup> Sweetness Factor

فرکانس لحظه‌ای<sup>۱</sup>، پهنای باند فرکانس لحظه‌ای<sup>۲</sup>، ضریب کیفیت لحظه‌ای<sup>۳</sup>، مقطع تک فرکانس<sup>۴</sup> و نشانگر طیفی فرکانس C<sup>۵</sup>۸۰ که در ادامه مبانی نظری هر یک ارائه خواهد شد.

## ۲-۳ نشانگرهای زمان - فرکانس

روش تبدیل S فشرده شده همزمان (SSST) یک روش تجزیه و تحلیل زمان - فرکانس است که قادر است، انواع مختلفی از نشانگرهای زمان - فرکانس را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها ارائه دهد. این روش برای تجزیه و تحلیل لایه نازک [۳۶]، شناسایی مناطق سایه فرکانس پایین در مخازن گاز [۳۷،۳۸،۳۹]، تشخیص کانالهای مدفون [۱۳،۴۰،۴۱]، میرایی سر و صدا [۴۲،۱۷] و واهمامیخت [۱۱،۴۳،۴۴،۴۵] کاربرد دارد.

انواع مختلفی از تجزیه و تحلیل زمان - فرکانس وجود دارد که دقت در تجزیه و تحلیل زمان - فرکانس بر روی درستی اطلاعات نشان داده شده توسط نشانگرهای زمان - فرکانس تاثیر می‌گذارد. از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال هر ردلرزه‌ای در حوزه زمان (یک بعدی) به حوزه‌ی زمان - فرکانس (دو بعدی) منتقل می‌شود. این تجزیه و تحلیل همچنین یک مقطع لرزه‌ای دو بعدی را از فضا - زمان به سه بعد فرکانس - فضا - زمان منتقل می‌کند و همچنین مکعب داده لرزه‌ای سه بعدی را از فضا - فضا - زمان به مکعب‌های تک فرکانس در حوزه‌ی فضا - فضا - زمان منتقل می‌کند [۴۶].

---

<sup>۱</sup> Average Instantaneous Frequency

<sup>۲</sup> Instantaneous Frequency Bandwidth

<sup>۳</sup> Average Quality Factor

<sup>۴</sup> Iso-Frequency Section

<sup>۵</sup> C80 Frequency

### ۳-۲-۱ نشانگرهای دامنه‌ی لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای غالب و فاکتور

#### شیرینی

در نمایش زمان - فرکانس برای یک سیگنال، یک توزیع فرکانسی برای هر نمونه زمانی وجود دارد که به عنوان طیف محلی شناخته می‌شود. در طیف محلی، دامنه بیشینه، دامنه لحظه‌ای زمان - فرکانس را برای آن نمونه زمانی نشان می‌دهد و فرکانس مربوط به آن دامنه لحظه‌ای، فرکانس لحظه‌ای است [۴۷]. دامنه لحظه‌ای معادل تعریف پوش لحظه‌ای<sup>۱</sup> در تحلیل سیگنال مختلط است که برای شناسایی سایه فرکانس پایین در مخازن گاز قابل استفاده است. فاکتور شیرینی بر اساس تعریف با تقسیم دامنه لحظه‌ای  $\alpha(t)$  به ریشه مربع فرکانس لحظه‌ای  $f_{peak}(t)$  به دست می‌آید.

$$sf(t) = \frac{\alpha(t)}{\sqrt{f_{peak}(t)}} \quad (۱-۳)$$

که در رابطه‌ی (۱-۳)،  $\alpha(t)$  دامنه لحظه‌ای،  $f_{peak}(t)$  فرکانس لحظه‌ای و  $sf(t)$  فاکتور شیرینی یک نشانگر لرزه‌ای است که برای تشخیص نقاطی که مستعد حضور هیدروکربن و گاز هستند به کار می‌رود که اغلب با دامنه‌ی زیاد و فرکانس پایین شناخته می‌شوند و بنابراین مقدار فاکتور شیرینی در این نقاط بالا خواهد بود. در حالت کلی بالا بودن مقدار فاکتور شیرینی طبق معادله‌ی (۱-۳) سه حالت خواهد داشت. ۱) دامنه‌ی بالا که نشانگر یک مرز بازتابنده‌ی قوی خواهد بود ۲) فرکانس پایین که محل تجمع سایه‌های کم فرکانس یا گاز را نشان می‌دهد و ۳) دامنه‌ی بالا و فرکانس پایین که یک ناحیه دارای مخزن را نشان می‌دهد.

### ۳-۲-۲ فرکانس C<sub>80</sub>

نشانگر دامنه تجمع نسبی یا C<sub>80</sub> یکی دیگر از نشانگرهای زمان - فرکانس است که نشان دهنده فرکانسی است که در آن انرژی طیف جمعیتی ۸۰ درصد انرژی طیف کل است به عبارت دیگر فرکانس

---

<sup>۱</sup> Instantaneous Envelope

C۸۰ فرکانسی است که در آن سطح زیر منحنی طیف دامنه‌ی محلی بین فرکانس صفر و فرکانس C۸۰، ۸۰ درصد سطح زیر منحنی طیف دامنه محلی بین بسامد صفر و فرکانس نایکوئیست<sup>۱</sup> می‌باشد. مقادیر کم برای فرکانس C۸۰ انباشت انرژی در قسمت‌های پایین پهنای باند کل را نشان می‌دهد، در حالی که مقادیر بالاتر C۸۰ طیف وسیع‌تری را نشان می‌دهد، همچنین مقادیر کوچک نشانگر مناطقی با تضعیف زیاد هستند [۴۸]. که در رابطه‌ی (۲-۳)  $f_0$  فرکانس، TFR نمایش زمان - فرکانس و  $f_{80}(t)$  مقدار فرکانس C۸۰ می‌باشد.

$$f_{80}(t) = \int_0^{f_0} TFR(f, t) df = 0.8 \int_0^{f_{nyquist}} TFR(f, t) df \quad (۲-۳)$$

### ۳-۲-۳ نشانگر فرکانس لحظه‌ای متوسط و پهنای باند فرکانس لحظه‌ای

نشانگر فرکانس لحظه‌ای متوسط که مشتق زمانی فاز لحظه‌ای است و نشانگر پهنای باند فرکانس لحظه‌ای که انحراف استاندارد اطراف فرکانس لحظه‌ای است که از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال مختلط به دست می‌آیند. با این حال، می‌توان آنها را با تجزیه و تحلیل زمان - فرکانس به دست آورد [۴۹]. در رابطه‌ی (۳-۳) TFR نمایش زمان - فرکانس،  $f$  فرکانس و  $f_{avg}(t)$  فرکانس لحظه‌ای متوسط خواهد بود.

$$f_{avg}(t) = \frac{\int_0^\infty f |TFR(f, t)|^2 df}{\int_0^\infty |TFR(f, t)|^2 df} \quad (۳-۳)$$

$$BW(t) = \sqrt{\frac{\int_0^\infty (f - f_{avg}(t))^2 f |TFR(f, t)|^2 df}{\int_0^\infty |TFR(f, t)|^2 df}} \quad (۴-۳)$$

---

<sup>۱</sup> Nyquist Frequency

فرکانس متوسط لحظه‌ای به عنوان یک نشانگر طیفی کارآمد برای ترسیم مناطق گازی در داده‌های لرزه‌ای شناخته می‌شود [۵۰]. در رابطه‌ی (۳-۴)  $BW(t)$  پهنای باند فرکانس لحظه‌ای، برای شناسایی مخزن چندان قابل استفاده نیست، اما برای تجزیه و تحلیل چینه‌نگاری کارآمدتر است [۵۱].

### ۳-۲-۴ ضریب کیفیت متوسط

طبق تعریف در رابطه‌ی (۳-۵) نشانگر ضریب کیفیت متوسط  $q_{avg}(t)$  با تقسیم فرکانس متوسط لحظه‌ای  $f_{avg}(t)$  به پهنای باند فرکانس لحظه‌ای  $BW_{avg}(t)$  در تجزیه و تحلیل سیگنال پیچیده به دست می‌آید. با این حال، این تعریف می‌تواند در تجزیه و تحلیل زمان فرکانس به کار گرفته شود تا ضریب کیفیت متوسط را فراهم کند

$$q_{avg}(t) = \frac{f_{avg}(t)}{2BW_{avg}(t)} \quad (۳-۵)$$

لازم به ذکر است که نشانگر ضریب کیفیت متوسط مربوط به تعریف فاکتورهای کیفی مورد استفاده در تقویت سیگنال و مفاهیم میرایی دامنه نیست اما می‌تواند به عنوان یک معیار کیفی برای شناسایی آنومالی‌های طیفی مورد استفاده قرار گیرد. هرگاه متوسط فرکانس لحظه‌ای و پهنای باند فرکانس لحظه‌ای در جهت مخالف متفاوت باشند، ضریب کیفیت متوسط لحظه‌ای آنومالی برجسته‌ای را نشان می‌دهد.

### ۳-۲-۵ نشانگر مقطع تک فرکانس

نشانگر مهم دیگر لرزه‌ای در گروه نشانگرهای زمان - فرکانس، نشانگر مقطع تک فرکانس است. از طریق تجزیه و تحلیل زمان - فرکانس داده‌های لرزه‌ای یک بعد اضافی به عنوان فرکانس به داده‌ها اضافه می‌شود، جایی که می‌توان بخشی از داده‌ها را با برش دادن در جهت فرکانس و نمایش یک بخش لرزه‌ای حاوی اطلاعات یک فرکانس واحد را به دست آورد. با بازرسی از طریق برش‌های مختلف با فرکانس‌های

مختلف، می‌توان تغییرات خصوصیات داده‌ها و مشخصه آنها را از طریق فرکانس‌های مختلف بررسی کرد. کاربردهای اصلی مقطع تک فرکانس، مشخص کردن مناطقی با سایه فرکانس پایین در مخازن گاز [۵۲]، شناسایی کانال‌های مدفون [۱۳]، و تجزیه و تحلیل لایه نازک است. در فصل بعد نشانگرهای مذکور را از تحلیل زمان - فرکانس داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش تبدیل S فشرده شده همزمان استخراج کرده و در مورد نتایج تفسیر صورت می‌پذیرد. همچنین مقایسه‌ای نیز با نتایج حاصل از تحلیل زمان - فرکانس با استفاده از تبدیل S استاندارد انجام می‌شود.



## فصل ۴: ارزیابی روش



## ۴-۱ مقدمه

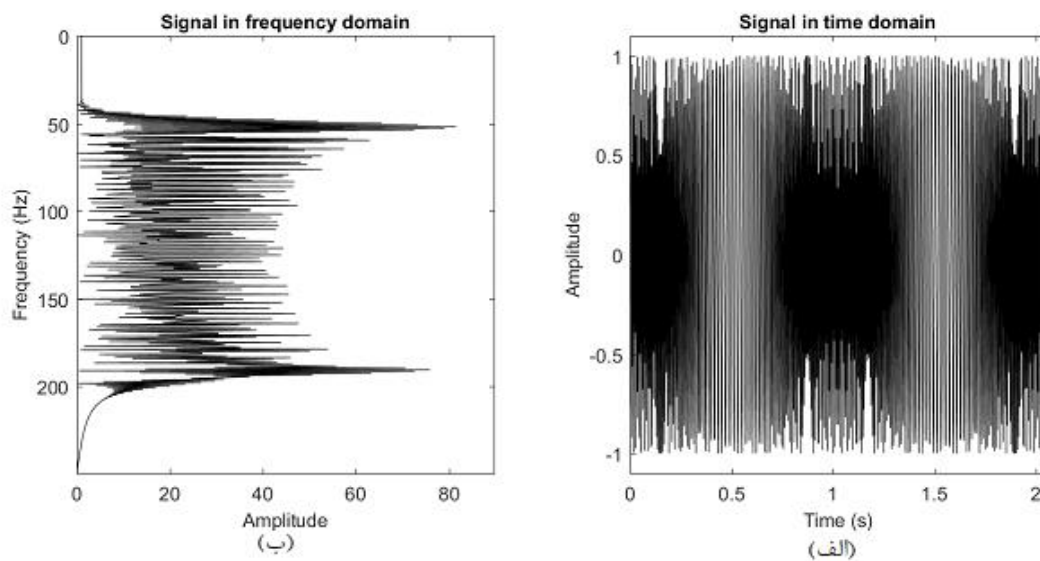
در این فصل، توانایی تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان (SSST) در سیگنال‌های مختلف ناپایا برای استخراج اطلاعات از نظر زمانی و فرکانسی تحلیل شده است. این قابلیت می‌تواند برای بررسی در شناسایی و جداسازی سازه‌های مخازن گاز مورد استفاده قرار گیرد که به طور موثر با روش‌های متداول دیگر قادر به انجام نیست. نتایج مربوط به شناسایی و تفکیک مناطق گازی با روش SSST با تبدیل S مقایسه شده‌اند.

## ۴-۲ پیاده‌سازی بر روی داده مصنوعی

در این قسمت عملکرد تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان بر روی چهار سیگنال ناپایا با توزیع زمانی و فرکانسی مختلف بررسی شده است و وضوح تفکیک زمانی و فرکانسی را در این تبدیل در مقایسه با تبدیل STFT با پنجره کوتاه و تبدیل STFT با پنجره بلند و تبدیل S با یکدیگر مقایسه شده‌اند و همچنین سیگنال بازسازی شده از تبدیل S فشرده شده همزمان که تا حدود زیادی سیگنال اصلی را بازسازی کرده است، نشان داده شده است.

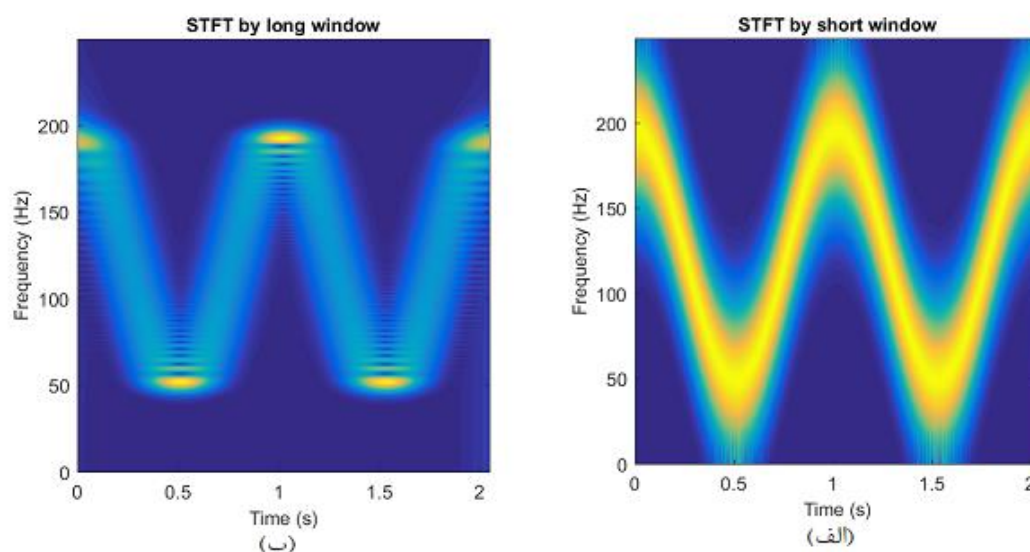
## ۴-۲-۱ سیگنال مصنوعی اول

در شکل ۴-۱ (الف) سیگنال در حوزه‌ی زمان که محتوی فرکانسی متغیر با زمان دارد و شکل ۴-۱ (ب) با اعمال تبدیل فوریه بر سیگنال، نمایش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس و اندازه طیف دامنه سیگنال بر حسب فرکانس را نشان می‌دهد.



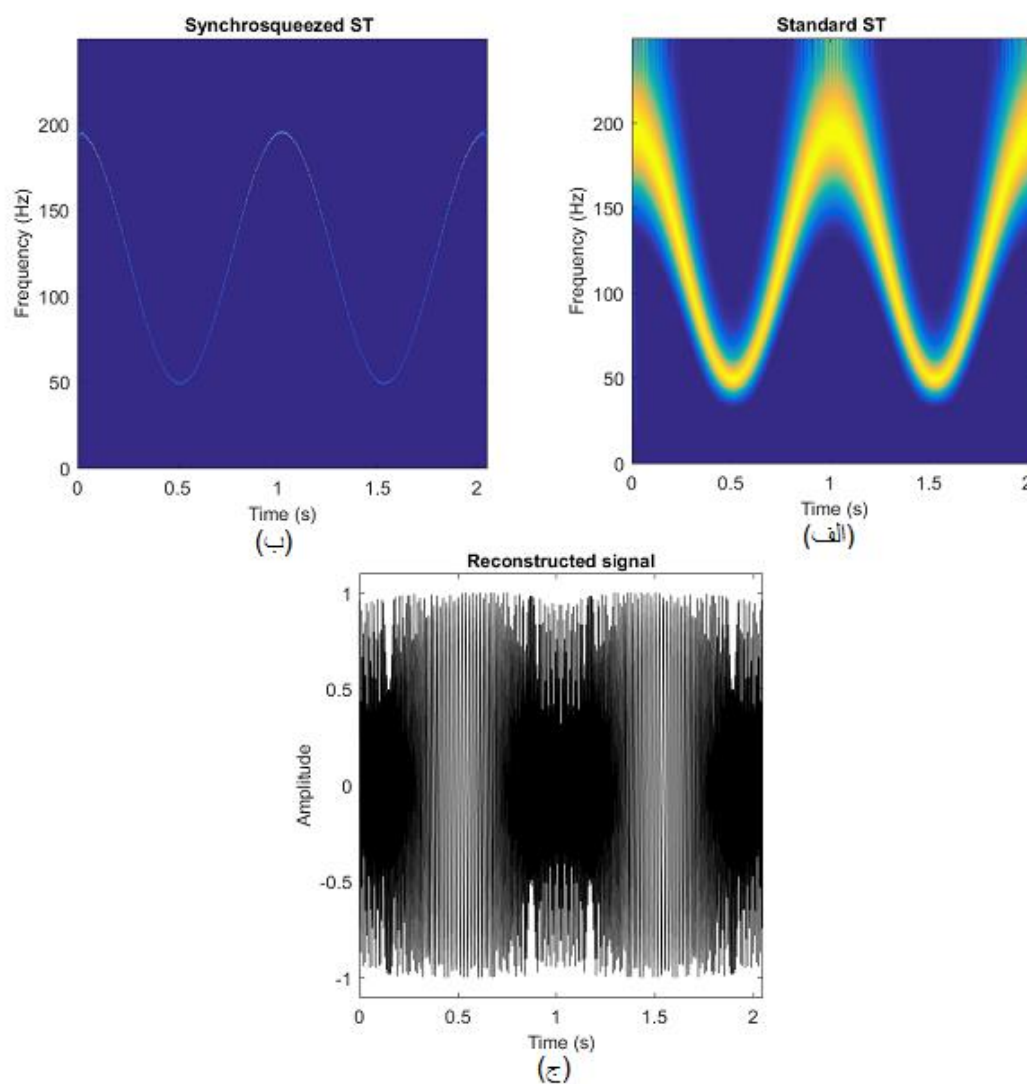
شکل ۴-۱: نمایش زمان - فرکانس حاصل از یک سیگنال مصنوعی، (الف) نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس.

شکل ۴-۲ (الف) نمایش زمان - فرکانس سیگنال که با اعمال تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه (STFT) با پنجره‌ی کوتاه به صورتی که در شکل ۴-۲ (الف) مشخص است به دلیل وجود اصل عدم قطعیت هایزنبرگ دارای تفکیک زمانی خوب و تفکیک فرکانسی ضعیف خواهد بود. همانطور که در شکل ۴-۲ (ب) مشخص است اگر طول پنجره را بیشتر در نظر گرفته شود تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند تفکیک زمانی ضعیف و تفکیک فرکانسی خوبی را خواهد داشت.



شکل ۴-۲: (الف) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه، (ب) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند.

استفاده از تبدیل  $S$ ، همانطور که در شکل ۴-۳ (الف) مشخص است در فرکانس‌های پایین دارای تفکیک زمانی ضعیف و در فرکانس‌های بالا دارای تفکیک فرکانسی ضعیف خواهد بود که باعث ایجاد خطا در تحلیل زمان - فرکانس خواهد شد در شکل ۴-۳ (ب) با اعمال روش فشرده‌سازی همزمان بر روی تبدیل  $S$  تمرکز انرژی در نمایش زمان - فرکانس بسیار افزایش یافته و تفکیک زمانی و فرکانسی را بالا می‌برد و خطای تفسیر نامطلوب را کاهش می‌دهد. شکل ۴-۳ (ج) همچنین سیگنال بازسازی شده از تبدیل  $S$  فشرده شده‌ی همزمان را نشان می‌دهد که این روش تا حدود زیادی می‌تواند سیگنال اصلی را بازسازی کند.



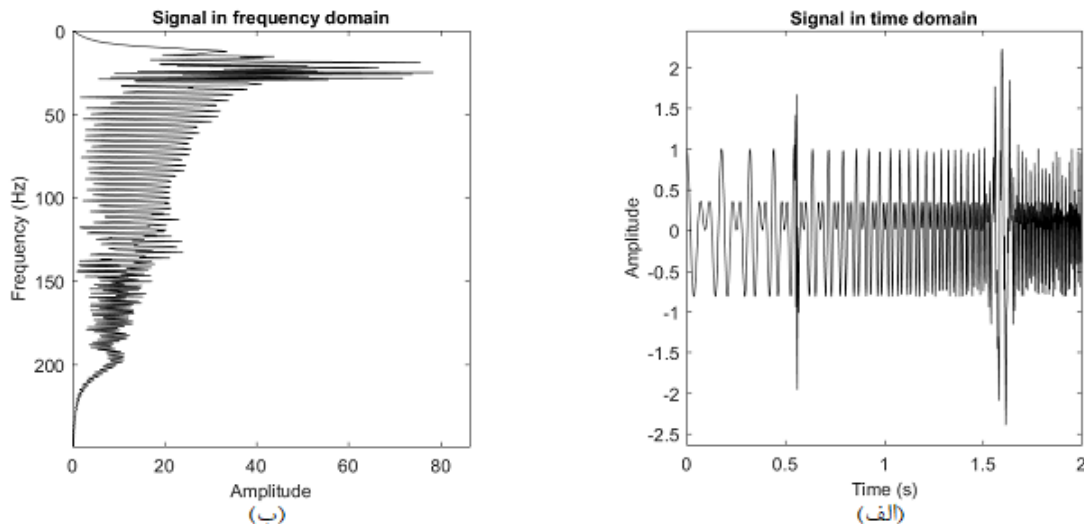
شکل ۴-۳: (الف) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل  $S$ ، (ب) نمایش زمان - فرکانس سیگنال با اعمال تبدیل  $S$  فشرده شده‌ی همزمان، (ج) نمایش سیگنال بازسازی شده.

## ۴-۲-۲ سیگنال مصنوعی دوم

سیگنال ناپایای بعدی یک سیگنال چیرپ دوگانه است که محتوای فرکانسی آن با زمان بصورت نمایی افزایش می‌یابد. این سیگنال با دو موجک مورلت<sup>۱</sup> ترکیب شده است که یکی در زمان ۰/۵ ثانیه با فرکانس غالب ۱۵۰ هرتز و یک موجک دیگر با زمان ۱/۶ ثانیه و فرکانس غالب ۲۵ هرتز تشکیل شده

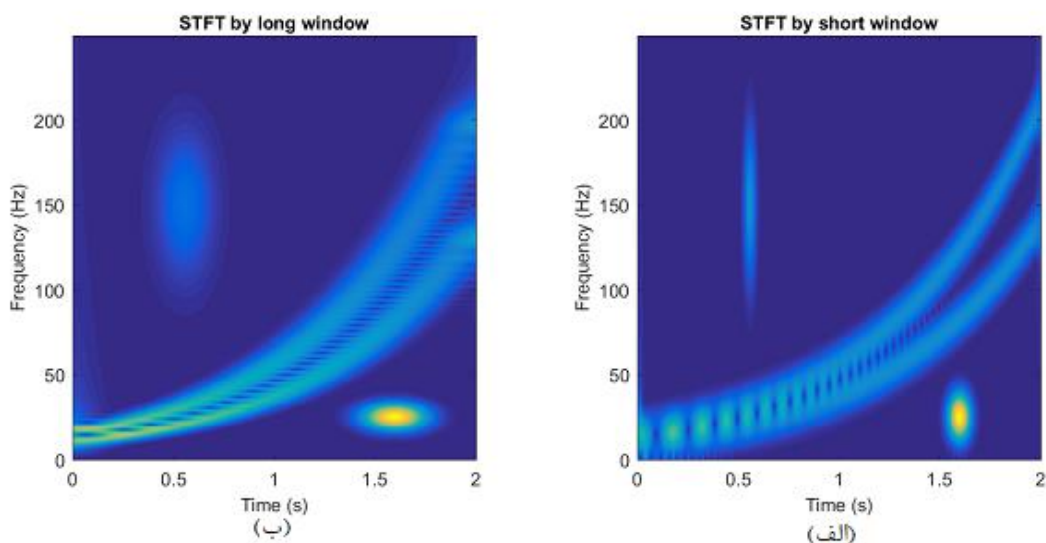
<sup>۱</sup> Morlet wavelet

است. شکل ۴-۴ (الف) و (ب) نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان و نمایش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس است که طیف دامنه‌ی سیگنال را نشان می‌دهد.



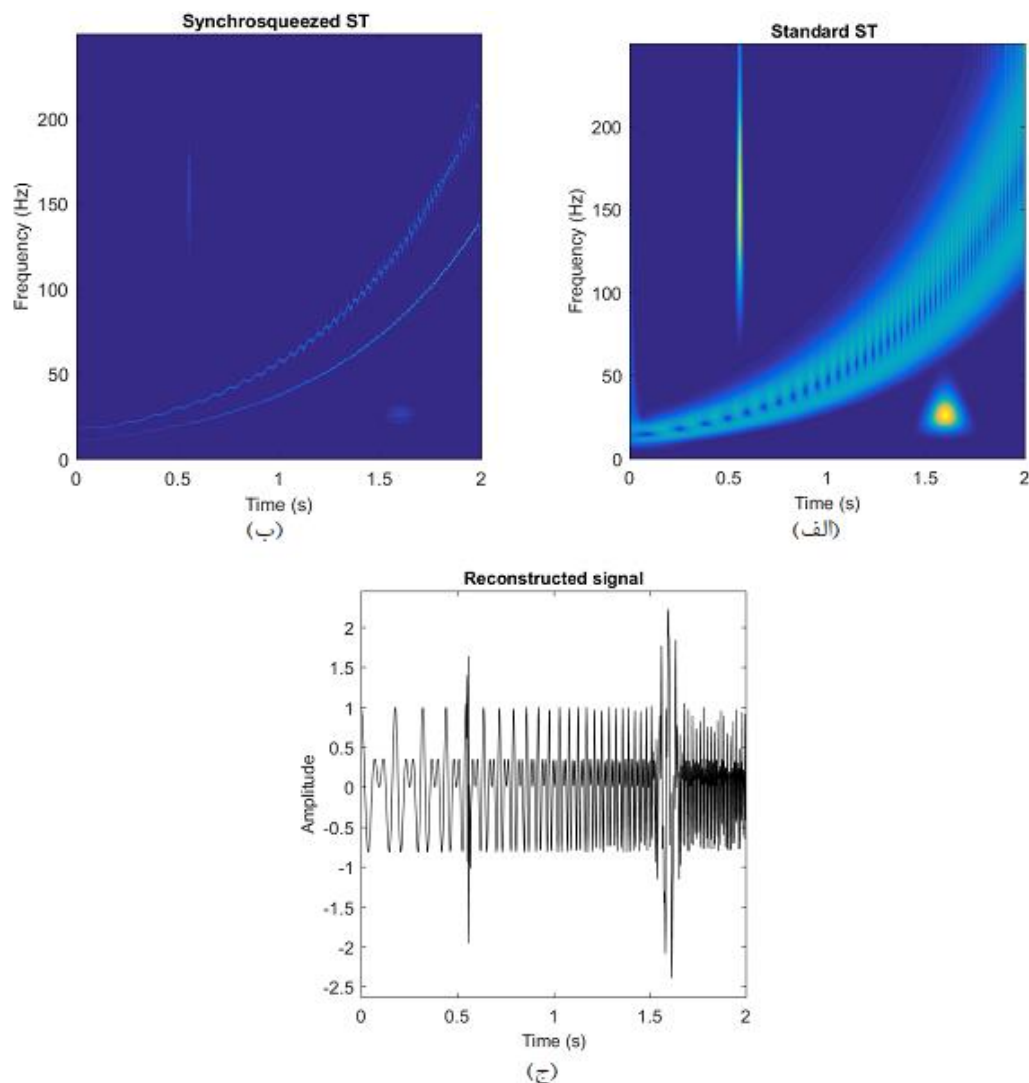
شکل ۴-۴: نمایش زمان - فرکانس یک سیگنال چیرپ دوگانه که یک موجک مورلت در زمان ۰/۵ ثانیه با فرکانس غالب ۱۵۰ هرتز و موجک دیگر در زمان ۱/۶ ثانیه و فرکانس غالب ۲۵ هرتز تشکیل شده است، (الف)نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان، (ب)نمایش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس.

در شکل ۴-۵ (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه است که بر روی این سیگنال پیاده‌سازی شده است و همانطور که مشاهده می‌شود دارای تفکیک زمانی خوب و تفکیک فرکانسی ضعیف خواهد بود و در شکل ۴-۵ (ب) که نمایش زمان فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند است دارای تفکیک فرکانسی خوب و تفکیک زمانی ضعیف خواهد بود. که در هر دو شکل قبل وجود اصل عدم قطعیت هایزنبرگ مانع از رسیدن به یک تفکیک زمانی و فرکانسی مطلوب در سیگنال می‌شود.



شکل ۴-۵: (الف) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه، (ب) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند.

با اعمال تبدیل  $S$  بر روی سیگنال، نمایش زمان - فرکانس این تبدیل در شکل ۴-۶ (الف) نشان داده شده است که تفکیک زمانی در فرکانس‌های پایین ضعیف است و همچنین در فرکانس‌های بالا، تفکیک فرکانسی ضعیف خواهد بود که با اعمال تبدیل  $S$  فشرده شده‌ی همزمان بر روی سیگنال در شکل ۴-۶ (ب) انرژی پخش شده در صفحه‌ی زمان - فرکانس را حول فرکانس مرکزی متمرکز می‌سازد و به دلیل این که روش فشرده سازی یک روش پساپردازشی است، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، مانع از رسیدن به یک تفکیک زمانی و فرکانسی مطلوب به طور همزمان نمی‌شود. در شکل ۴-۶ (ج) سیگنال بازسازی شده از روش تبدیل  $S$  فشرده شده‌ی همزمان نشان داده شده است که در آن سیگنال تا حدود زیادی بازسازی شده است.

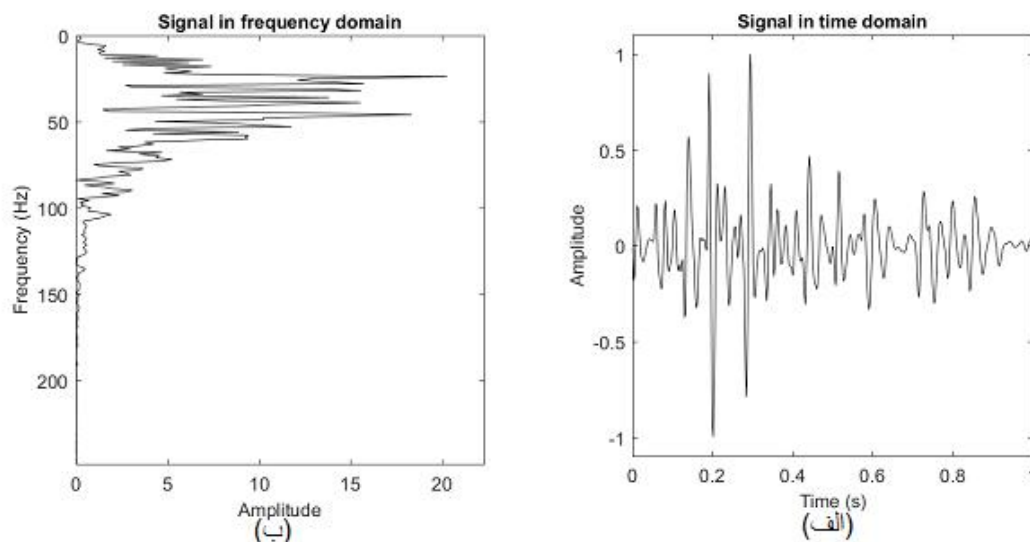


شکل ۴-۶: (الف) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل S، (ب) نمایش زمان - فرکانس حاصل از تبدیل S فشرده - شده، (ج) سیگنال بازسازی شده از تبدیل S فشرده شده همزمان.

## ۴-۲-۳ سیگنال مصنوعی سوم

با توجه به این که هدف، نشان دادن کاربرد لرزه‌ای تبدیل S فشرده شده همزمان است در ابتدا یک داده‌ی لرزه‌ای بدون نوفه بررسی می‌شود و سپس یک داده‌ی لرزه‌ای نوفه‌دار بررسی خواهد شد. ردلرزه مورد نظر از هم‌امیخت یک موجک مینیمم فاز با فرکانس غالب ۴۰ هرتز با سری بازتاب تصادفی با فاکتور کیفیتی ۵۰ ایجاد شده است و نمایش زمان - فرکانس برای تبدیل‌های مختلف نشان داده

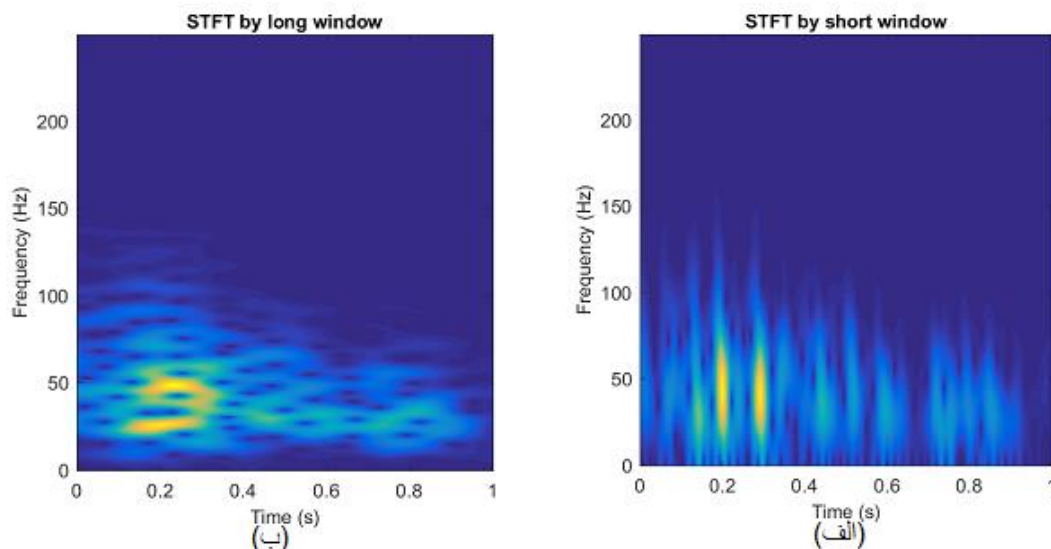
می‌شود. شکل ۷-۴ (الف) و (ب) نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان و نمایش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس است.



شکل ۷-۴: نمایش زمان - فرکانس یک سیگنال بدون نوفه، (الف) نمایش در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش در حوزه‌ی فرکانس.

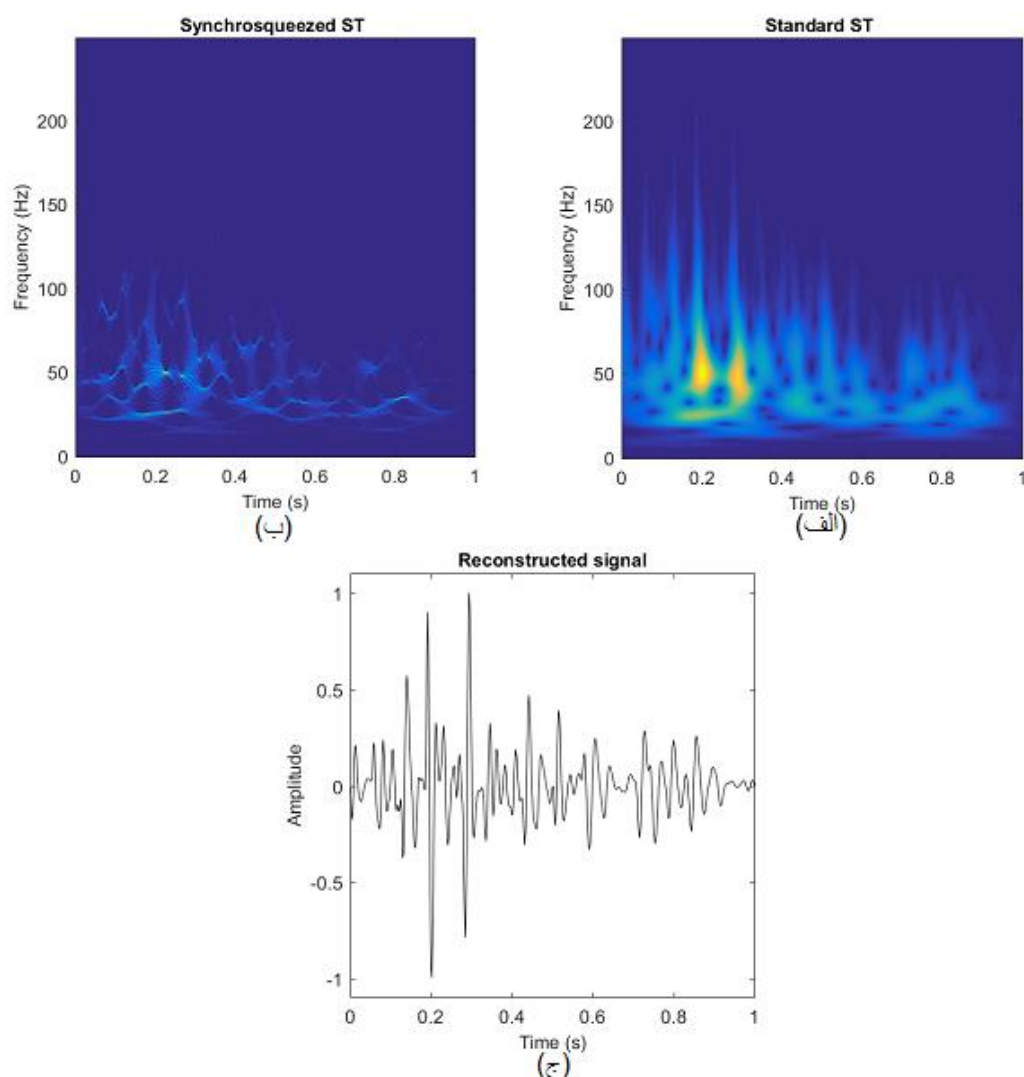
شکل ۸-۴ (الف) نمایش زمان فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه بر روی داده‌ی لرزه‌ای است که در آن تفکیک زمانی خوب و تفکیک فرکانسی ضعیفی مشاهده می‌شود و در شکل ۸-۴ (ب) نمایش زمان - فرکانس سیگنال لرزه‌ای با اعمال تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند که در آن تفکیک فرکانسی خوب و تفکیک زمانی ضعیف خواهد بود. در دو شکل بالا اصل عدم قطعیت همانند مورد قبل مانع از رسیدن به یک تفکیک زمانی و فرکانسی مطلوب به طور همزمان می‌شود.





شکل ۴-۸: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه، (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند.

شکل ۴-۹ (الف) که در آن تبدیل S بر این سیگنال اعمال شده است و در فرکانس‌های پایین تفکیک زمانی پایین و در فرکانس‌های بالا تفکیک فرکانسی ضعیفی ارائه خواهد داد. در ادامه در شکل ۴-۹ (ب) که نمایش زمان - فرکانس تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان را نشان می‌دهد و انرژی پخش شده در تبدیل S را حول فرکانس مرکزی متمرکز می‌سازد و شکل ۴-۹ (ج) که سیگنال بازسازی شده تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان را نشان می‌دهد.

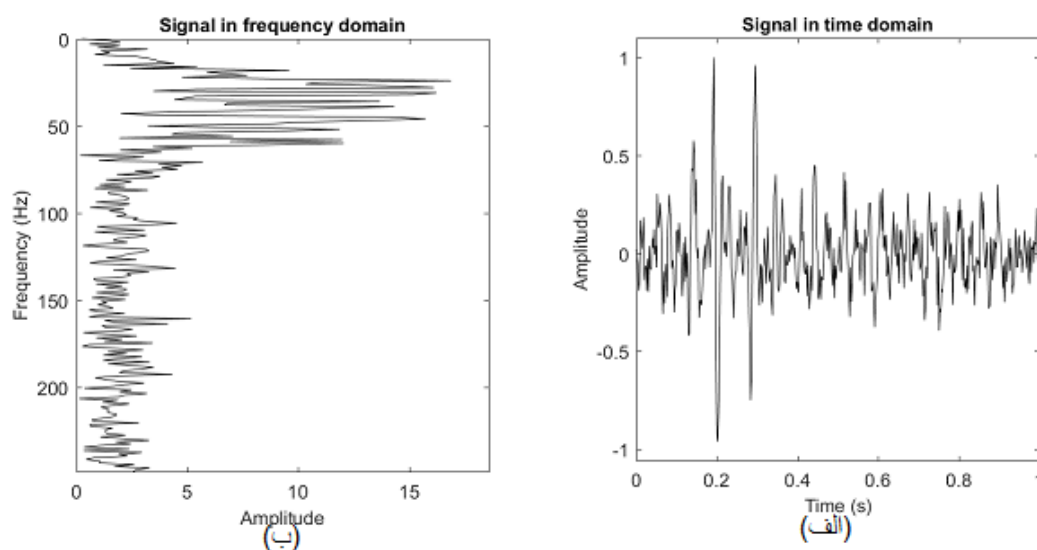


شکل ۹-۴: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S، (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S فشرده شده همزمان، (ج) سیگنال بازسازی شده تبدیل S فشرده شده همزمان.

## ۴-۲-۴ سیگنال مصنوعی چهارم

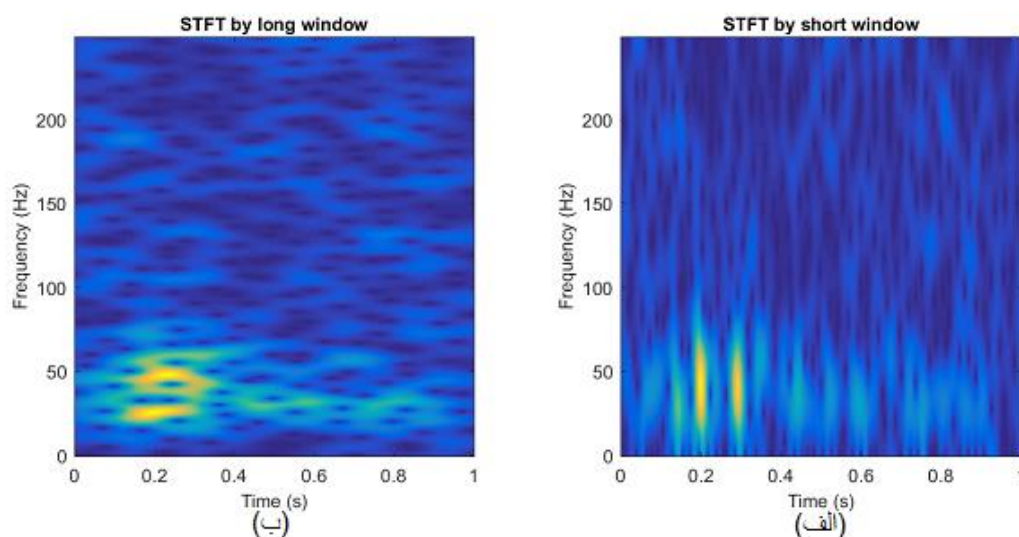
چون داده‌های لرزه‌ای همواره دارای نوفه هستند بنابراین روش فشرده‌سازی همزمان باید در داده‌های دارای نوفه نیز وضوح و بازسازی خوبی را ایجاد کند تا کارایی آن به خوبی مشخص شود. به همین دلیل یک نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه دو به سیگنال لرزه‌ای اضافه می‌شود تا یک داده‌ی لرزه‌ای همراه با نوفه ایجاد شود.

شکل ۴-۱۰ (الف) یک سیگنال لرزه‌ای دارای نوفه را در حوزه‌ی زمان نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۰ (ب) سیگنال را در حوزه‌ی فرکانس نشان می‌دهد.



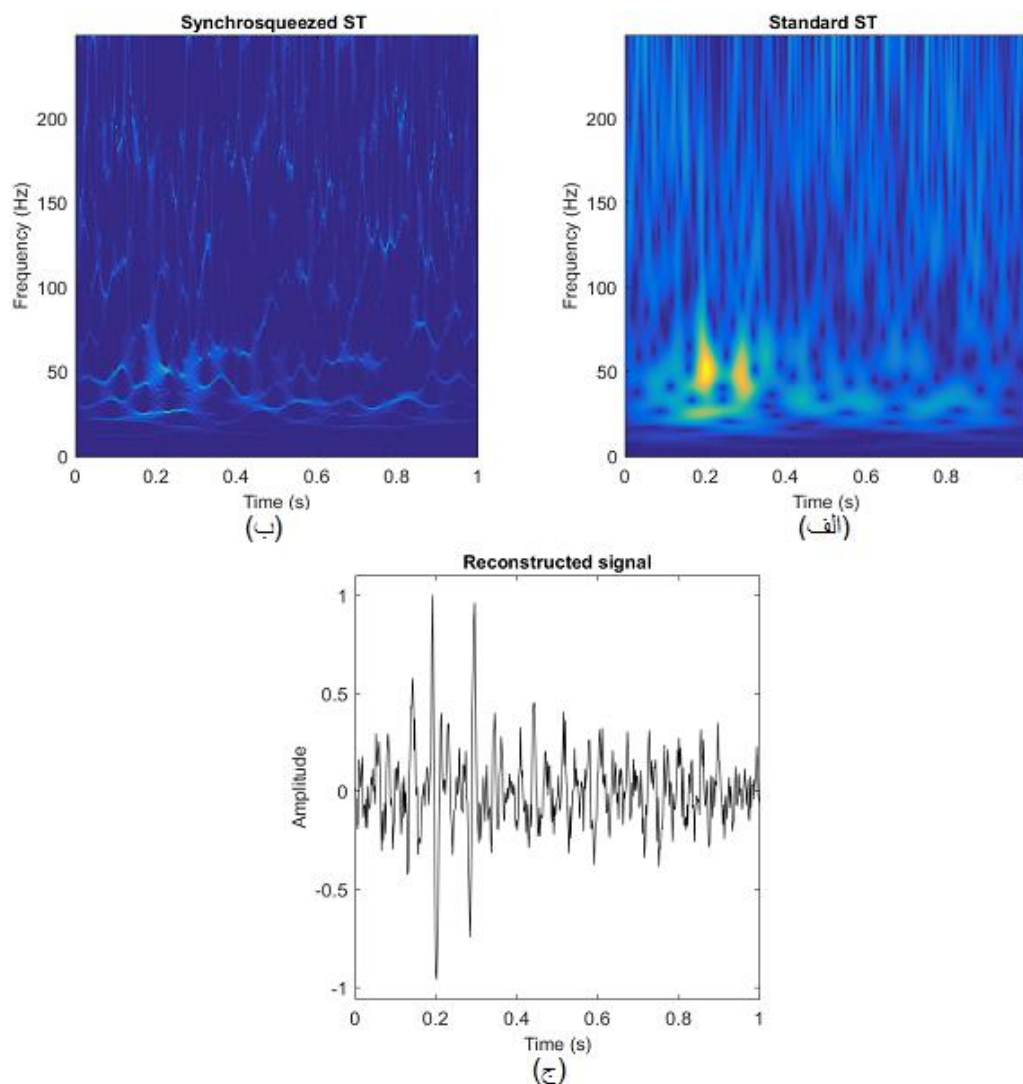
شکل ۴-۱۰: نمایش زمان - فرکانس یک داده‌ی لرزه‌ای دارای نوفه، (الف) نمایش در حوزه‌ی زمان، (ب) نمایش در حوزه‌ی فرکانس.

شکل ۴-۱۱ (الف) تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه که بر روی سیگنال اعمال شده است را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل مشخص است تفکیک زمانی آن خوب و تفکیک فرکانسی آن ضعیف است و در شکل ۴-۱۱ (ب) که تبدیل STFT با پنجره بلند را نشان می‌دهد تفکیک زمانی ضعیف و تفکیک فرکانسی خوبی ارائه می‌دهد.



شکل ۴-۱۱: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی کوتاه، (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل STFT با پنجره‌ی بلند.

شکل ۴-۱۲ (الف) تبدیل S سیگنال را نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین تفکیک زمانی ضعیف و در فرکانس‌های بالا تفکیک فرکانسی ضعیف ارائه می‌دهد و در شکل ۴-۱۲ (ب) تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان را مشاهده می‌شود که بر روی یک داده لرزه‌ای دارای نویز پیاده‌سازی شده و تفکیک زمانی و فرکانسی مطلوبی ارائه می‌دهد. و شکل ۴-۱۲ (ج) سیگنال بازسازی شده‌ی تبدیل S فشرده شده همزمان را نشان می‌دهد که تا حدود بسیار زیادی بازسازی شده است.



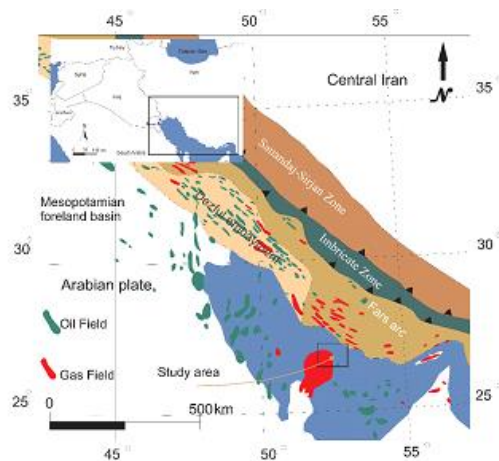
شکل ۴-۱۲: (الف) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S، (ب) نمایش زمان - فرکانس تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان، (ج) سیگنال بازسازی شده‌ی تبدیل S فشرده شده‌ی همزمان.

## ۳-۴ استخراج نشانگرهای زمان – فرکانس از داده‌ی واقعی

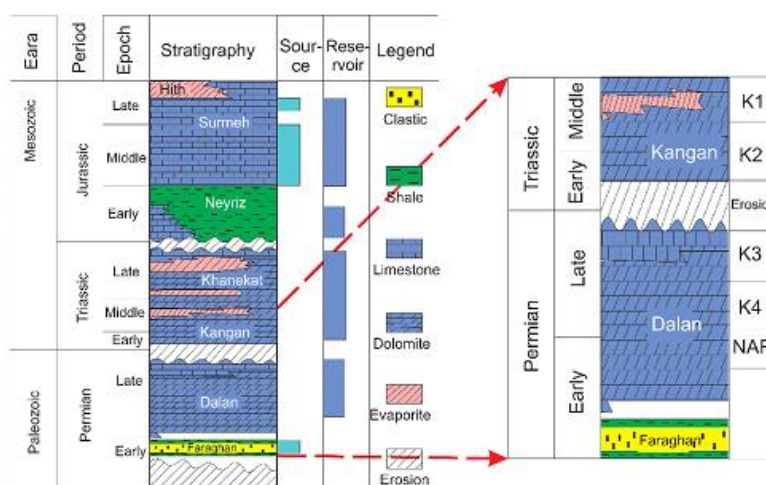
در این بخش، کارایی روش SSST در استخراج نشانگرهای لرزه ای زمان – فرکانس از یک مجموعه داده واقعی مربوط به یک مخزن، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. داده‌های لرزه‌ای، یک برش عرضی (inline) از یک حجم سه بعدی داده لرزه‌ای برانبارش یافته پس از مهاجرت است. شکل ۴-۱۳ منطقه مطالعه شده و ستون چین‌نگاری میدان گازی را نشان می‌دهد. سازندهای هدف، که سازندهای دالان و کنگان هستند، از صخره‌های کربناته تشکیل شده و سنگ آهک و دولومیت با میان لایه‌هایی از جنس آنیدریت، که همه در دوره پرمین و تریاسیک<sup>۱</sup> هستند، تشکیل شده است [۵۳]. توالی سازندهای دالان – کنگان شامل چهار واحد مخزنی است که به ترتیب در افق‌های K<sup>۳</sup> و K<sup>۴</sup> در سازند دالان و افق‌های K<sup>۱</sup> و K<sup>۲</sup> در سازند کنگان قرار دارند.

---

<sup>۱</sup> Permian and Triassic



(الف)



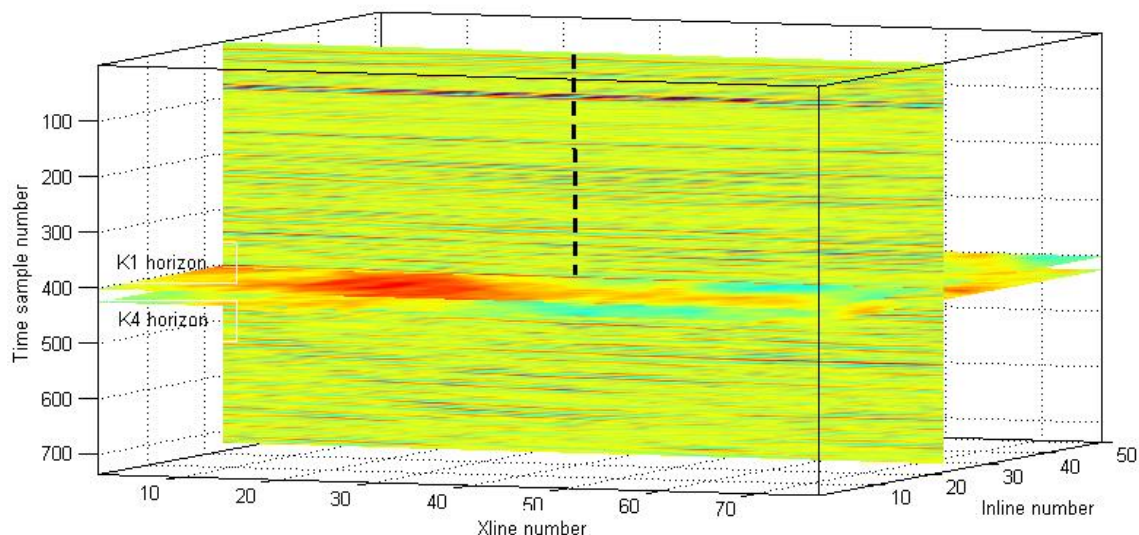
(ب)

شکل ۴-۱۳: (الف) منطقه مورد مطالعه، (ب) ستون چین‌نگاری منطقه مورد مطالعه و سازند هدف، که مربوط به یک مخزن گاز است [۵۴].

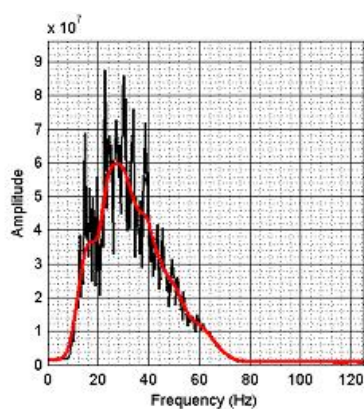
شکل ۴-۱۴ مکعب داده‌های لرزه‌ای و افق‌های هدف K۱ و K۴ را نشان می‌دهد و خط‌چین نقطه‌ای سیاه در شکل ۴-۱۴، چاه اکتشافی حفاری شده در منطقه مورد مطالعه است. این دو واحد بر اساس داده‌های حفاری و پتروفیزیک که در اینجا نشان داده نشده است، انتخاب شده‌اند که مناطق تجمع گاز را نشان می‌دهند. برای بررسی‌های بهتر در شکل ۴-۱۵ یک مقطع عرضی دو بعدی از مکعب سه بعدی استخراج شده است که خطوط زرد و قرمز نقطه‌چین در شکل ۴-۱۵ (الف) به ترتیب دو سازه هدف K۱ و K۴ را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده شد، این سازه‌های هدف بسیار نزدیک به یکدیگر هستند و به سختی می‌توان آنها را در تصاویر لرزه‌ای از یکدیگر جدا کرد و جداسازی آنها نیازمند مدل‌سازی‌های



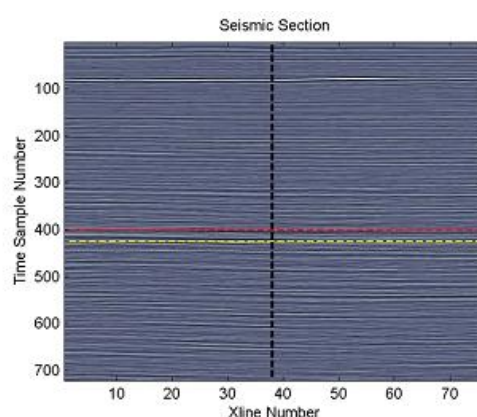
بیشتر زمین‌شناسی و مخزن است. شکل ۴-۱۵ (ب) طیف دامنه هموار شده با فرکانس غالب ۳۰ هرتز با خط قرمز مقطع لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: نمایش سه بعدی مکعب داده‌های لرزه‌ای که ساختار ساده میدان مطالعه بسترهای نازک و تشکیلات مخزن لایه نازک در افق‌های K۱ و K۴ که به سختی قابل تفکیک هستند را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۵: (الف) انتخاب شده از مکعب داده لرزه‌ای سه بعدی. تشکیلات مخزن هدف، K۱ و K۴ به ترتیب با خط چین قرمز و زرد نشان داده شده‌اند. خط چین سیاه محل چاه اکتشافی را نشان می‌دهد، (ب) طیف دامنه درون-یابی شده و منحنی قرمز رنگ، طیف دامنه هموار شده را نشان می‌دهد.

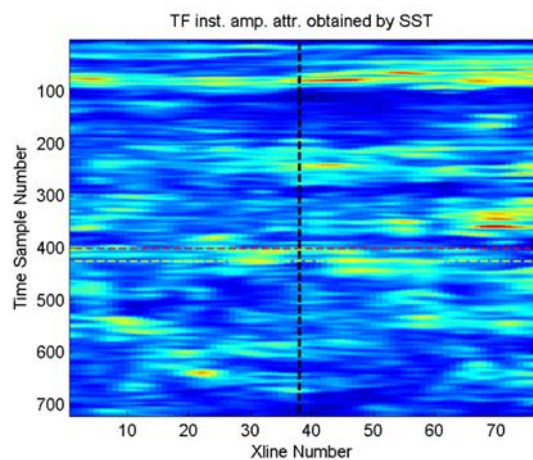
در داده‌های لرزه‌ای فرکانس غالب، کم و برابر با ۳۰ هرتز است و همچنین پهنای باند لرزه‌ای به اندازه کافی گسترده نیست. جداسازی لایه‌های مورد نظر به ویژه هنگامی که اثر تیونینگ بر روی داده‌ها تاثیر گذاشته باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین مشخص کردن مناطق سایه فرکانس پایین در

این داده‌ها با محدودیت‌های بالایی همراه است که با استفاده از نشانگرهای زمان - فرکانس می‌توان این مشکل را تا حدی برطرف نمود. یکی از روش‌های موثر برای حل این مشکل روش تجزیه طیفی [۵۵،۵۶] می‌باشد. به دلیل این که روش ST، در فرکانس‌های پایین تفکیک‌پذیری زمانی پایینی را ارائه می‌دهد، در تعیین مناطق سایه فرکانس پایین نمی‌تواند وضوح خوبی را ایجاد نماید، بنابراین از روش SSST که وضوح بالاتری را در نمایش زمان - فرکانس برای تشخیص لایه سایه فرکانس پایین ایجاد می‌کند، استفاده می‌شود. همانطور که در مقطع لرزه‌ای در شکل ۴-۱۵ (الف) دیده می‌شود، تعداد زیادی بازتابنده با فاصله تفکیکی کوچک و لایه‌های نازک وجود دارند. با استفاده از نشانگرهای زمان - فرکانس و از طریق مشخص کردن مناطق سایه کم فرکانس، شناسایی این نقاط راحت‌تر صورت خواهد گرفت. از آنجا که روش ST، در فرکانس‌های پایین وضوح کمی را ارائه می‌دهد، نمی‌تواند مشکل را در ترسیم مناطق سایه حل کند، در حالی که روش SSST، وضوح بهتری را در نمایش زمان - فرکانس، برای تشخیص مناطق سایه کم فرکانس خواهد داشت. شکل ۴-۱۶ نشانگرهای لرزه‌ای زمان - فرکانس مناسب، برای تشخیص تجمع گاز در داده‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۶ (الف) و (ب) به ترتیب نشانگرهای دامنه لحظه‌ای به دست آمده، توسط روش ST و SSST را نشان می‌دهد. در نشانگر دامنه لحظه‌ای بدست آمده از روش ST شکل ۴-۱۶ (الف)، به دلیل پراکندگی انرژی، تشخیص و تفکیک دو سازند هدف که افق K۱ و K۴ هستند مشکل خواهد بود. دامنه لحظه‌ای به دست آمده با روش SSST در شکل ۴-۱۶ (ب) تمرکز بهتر انرژی و در نتیجه وضوح بالاتر را فراهم می‌کند که منجر به تفکیک بهتر و شناسایی دو سازند هدف با مقادیر دامنه بالا می‌شود. در شکل بعدی نشانگر فرکانس اوج لحظه‌ای به دست آمده، توسط روش ST و SSST به ترتیب در شکل ۴-۱۶ (ج) و (د) نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت هر دو بخش دارای مناطق سایه کم فرکانس هستند و روش ST نمی‌تواند این مناطق سایه را به عنوان دو ناهنجاری جداگانه تصویر کند، در حالی که با روش SSST به راحتی به عنوان دو ناهنجاری تشخیص داده می‌شوند. نشانگر فاکتور شیرینی نیز با روش ST و روش SSST در شکل ۴-۱۶ (ن) و شکل ۴-۱۶ (و) نشان داده شده است. برتری نتیجه به دست آمده با روش

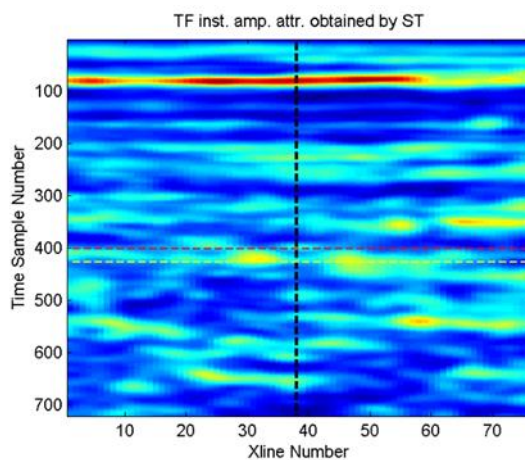


SSST در مقایسه با روش ST در نشانگر فاکتور شیرینی در شکل ۱۶-۴ (ن) و (و) ارائه شده است. پیش بینی می‌شود که فاکتور شیرینی با توجه به تعریف آن و به دلیل دامنه لحظه‌ای بالا و فرکانس لحظه‌ای پایین برای هر نمونه، مقادیر بالایی در سازند هدف از خود نشان دهد. که جداسازی مناطق گاز لایه نازک با فاکتور شیرینی در شکل ۱۶-۴ (و) که از روش SSST به دست آمده در مقایسه با روش ST در شکل ۱۶-۴ (ن) نتایج بهتری را ارائه کرده است. نشانگر دیگر نشانگر فرکانس C۸۰ است که با استفاده از روش ST، در شکل ۱۶-۴ (ه) و همچنین روش SSST، در شکل ۱۶-۴ (ی) نشان داده شده است که اختلاف کمتری بین نتایج نشان می‌دهد. با این حال، بخش فرکانس C۸۰ به دست آمده با روش SSST وضوح بیشتری را در مقایسه با بخش فرکانس C۸۰ روش ST نشان می‌دهد.

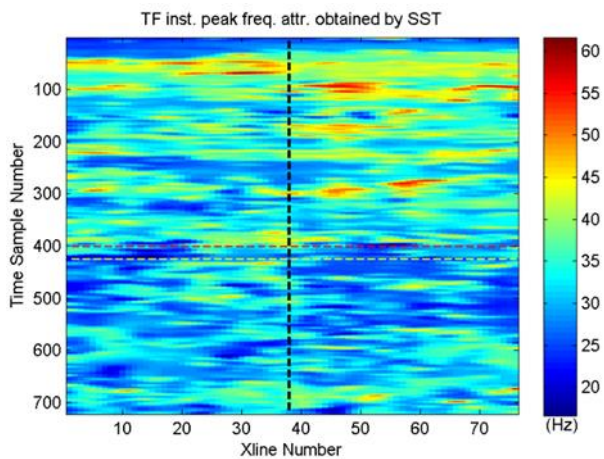
به طور کلی نشانگرهای زمان - فرکانس به دست آمده از روش ST شکل ۱۶-۴ (الف)، (ج)، (ن)، (ه) به دلیل وضوح پایین نمی‌توانند دو لایه نازک گاز را از هم جدا کنند. با این حال، نتایج نشانگرهای زمان فرکانس به دست آمده توسط روش SSST در شکل ۱۶-۴ (ب)، (د)، (و)، (ی) وضوح بالاتر و شناسایی و جداسازی بهتر تشکیلات هدف در هر برش را نشان می‌دهند.



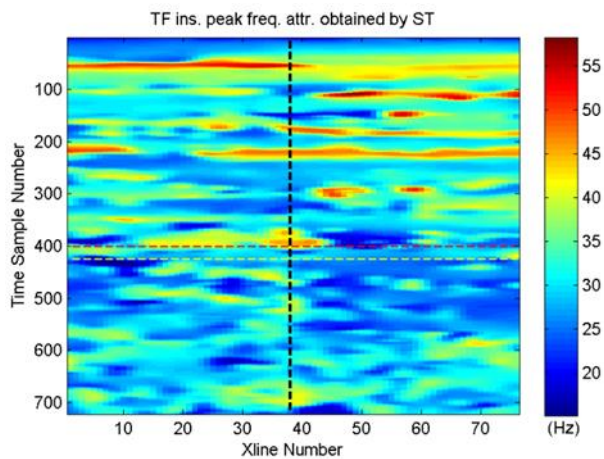
(ب)



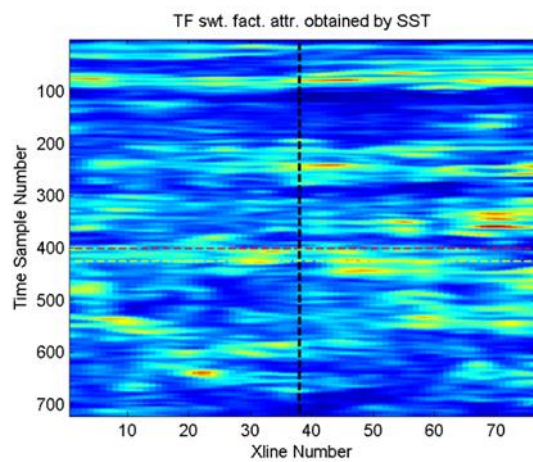
(الف)



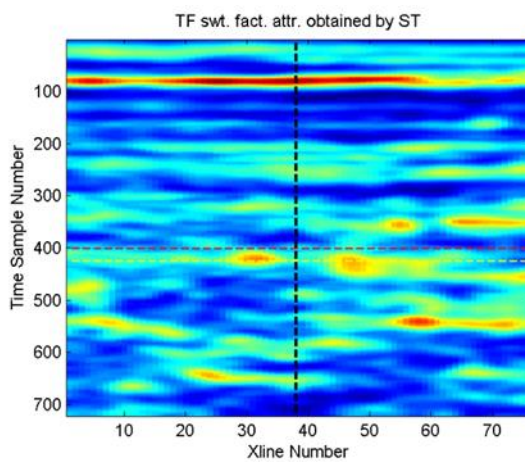
(د)



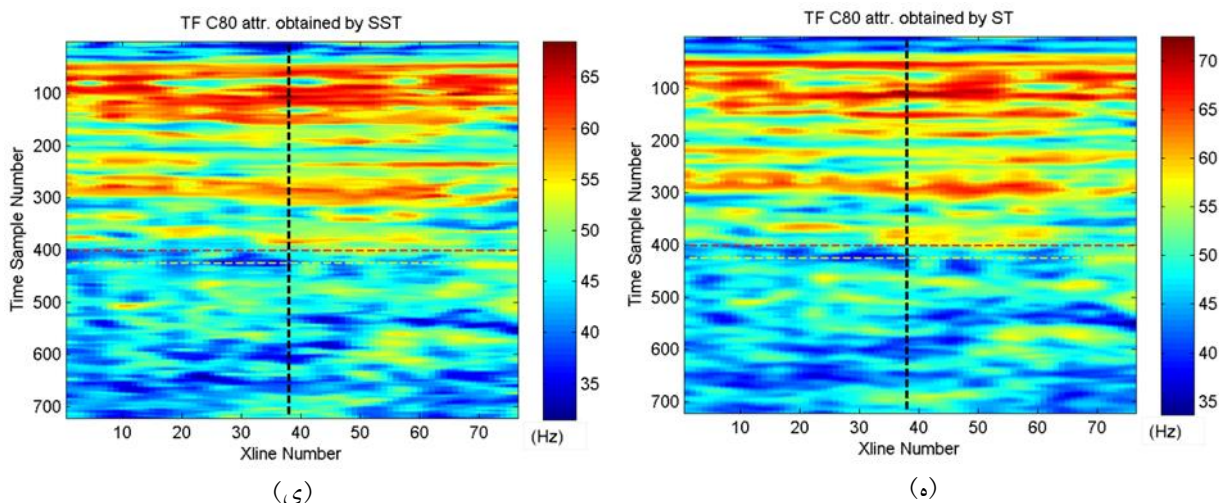
(ج)



(و)



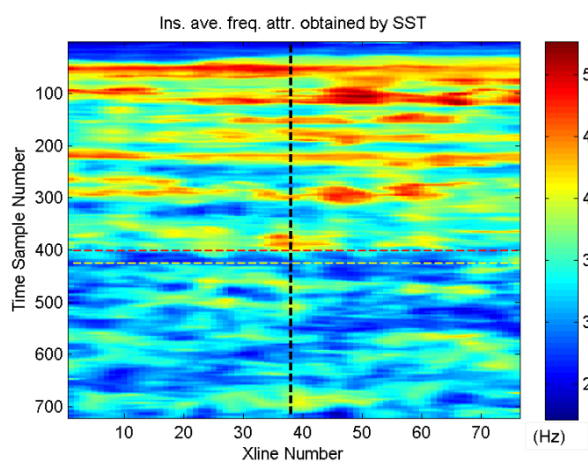
(ن)



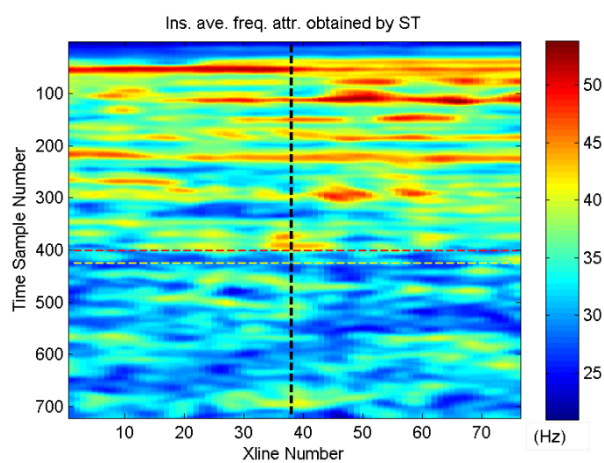
شکل ۴-۱۶: (الف) نشانگر دامنه لحظه‌ای با استفاده از روش ST بدست آمده است، (ب) نشانگر دامنه لحظه‌ای بدست آمده با روش SST، (ج) نشانگر فرکانس اوج لحظه‌ای بدست آمده با روش ST، (د) نشانگر فرکانس اوج لحظه‌ای بدست آمده با روش SST، (ن) نشانگر فاکتور شیرینی با روش ST بدست آمده است، (و) نشانگر فاکتور شیرینی با روش SST بدست آمده است، (ه) نشانگر فرکانس C80 با استفاده از روش ST و (ی) نشانگر فرکانس C80 با روش SST بدست آمده است.

شکل ۴-۱۷ سه نشانگر زمان - فرکانس دیگر که عبارتند از متوسط فرکانس لحظه‌ای، پهنای باند فرکانس لحظه‌ای و نشانگر فاکتور Q متوسط لحظه‌ای که توسط روش‌های ST و SSST به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. نشانگر فرکانس متوسط لحظه‌ای در شکل ۴-۱۷ (ب) که با روش SSST به دست آمده است، تفکیک‌پذیری زمانی بهتری را در مقایسه با روش ST در شکل ۴-۱۷ (الف) نشان می‌دهد. نشانگر پهنای باند فرکانسی، عملکرد بهتر روش SSST را در تشخیص بسترهای لایه نازک گاز نسبت به عملکرد ST نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۷ (ج) نشانگر پهنای باند فرکانس لحظه‌ای به دست آمده توسط روش ST را نشان می‌دهد که در جداسازی بسترهای لایه نازک گاز عملکرد خوبی ندارد در حالی که این دو سازند هدف در شکل ۴-۱۷ (د) با روش SSST بهتر تفکیک شده‌اند. نشانگر بعدی که بر روی داده اعمال شده است نشانگر فاکتور کیفیت لحظه‌ای Q است، نشانگر فاکتور کیفیت لحظه‌ای Q طبق تعریف آن مرتبط با پهنای باند فرکانس لحظه‌ای و فرکانس متوسط لحظه‌ای است که از مزایای هر دو نشانگر، می‌توان به جداسازی مناطق گاز لایه نازک اشاره نمود. شکل ۴-۱۷ (ن) فاکتور کیفیت لحظه‌ای Q که با روش ST بدست آمده است و شکل ۴-۱۷ (و) نتایج همان نشانگر را که توسط SST اعمال شده را نشان می‌دهد.

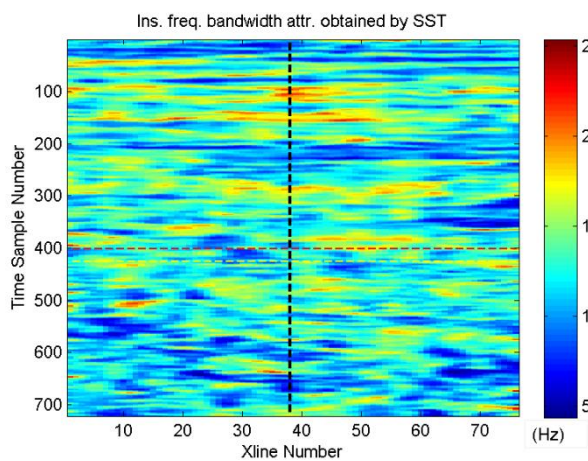




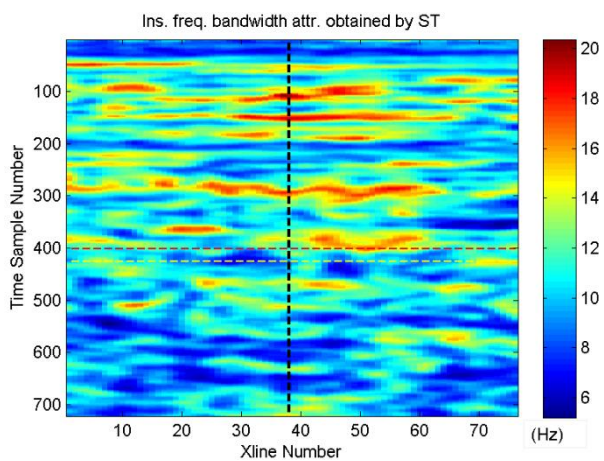
(ب)



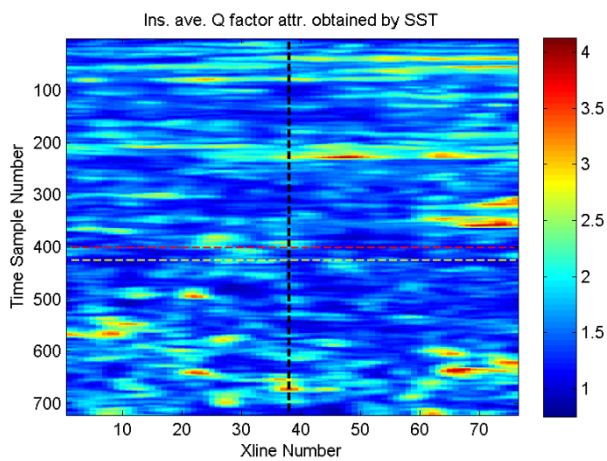
(الف)



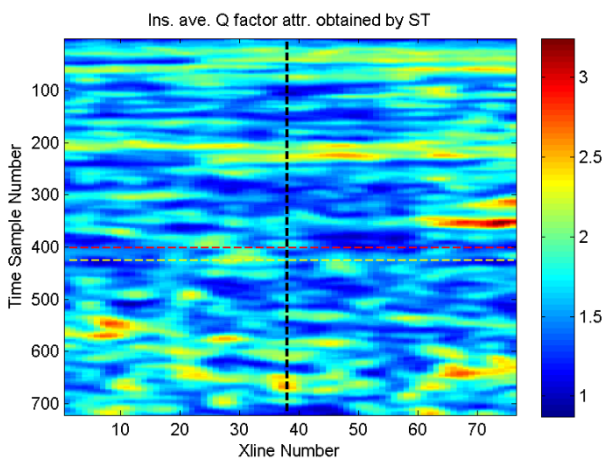
(د)



(ج)



(و)



(ن)

شکل ۴-۱۷: (الف) و (ب) نشانگر فرکانس متوسط لحظه‌ای است که به ترتیب با روش ST و SSST بدست می‌آید و (ج) و (د) به ترتیب نشانگر پهنای باند فرکانس فوری به دست آمده با روش ST و SSST هستند و (و) و (ن) نشانگر Q ضریب کیفیت لحظه‌ای Q است که با استفاده از روش ST و SSST بدست آمده است.

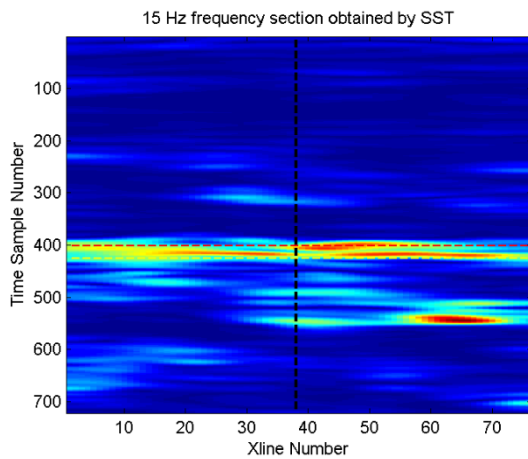
نشانگر مهم زمان - فرکانس دیگر که به طور گسترده در تفسیر داده‌های لرزه‌ای برای اکتشاف نفت استفاده می‌شود، نشانگر مقطع تک فرکانس است. بررسی نشانگرهای تک فرکانس نیاز به تعریف استراتژی و انتخاب بهترین نشانگر تک فرکانس ممکن برای نشان دادن هدف دارد. فرکانس‌های پیشنهادی که در اینجا برای تصویرگری انتخاب شده‌اند، براساس استراتژی پیشنهادی کاستاگنا<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۳، فرکانس ۳۰ هرتز غالب، ۱۵ هرتز به عنوان فرکانس پایین و ۴۵ هرتز به عنوان محدوده فرکانس بالا برای بررسی انتخاب شدند [۳۷]. وجود گاز در محیط انتشار موج، باعث کاهش انرژی موج لرزه‌ای و میرا شدن سیگنال و همچنین از بین رفتن مولفه‌های فرکانس بالا موج لرزه‌ای می‌شود. این پدیده فرکانس غالب سیگنال را به مقادیر فرکانس پایین منتقل می‌کند و در مقادیر فرکانس پایین، که به سایه فرکانس پایین معروف هستند، باعث ایجاد آنومالی می‌شوند [۴۷]. بدیهی است که این آنومالی شدید نباید در بخش‌های با فرکانس بالا ظاهر شود و بنابراین می‌توان با مقایسه مقادیر تک فرکانس پایین و بالا به راحتی تشخیص داد.

شکل ۴-۱۸ نشانگرهای مقطع تک فرکانس را که توسط روش‌های ST و SSST که برای فرکانس‌های مختلف انتخاب شده‌اند را نشان می‌دهد. برای مقاطع تک فرکانس پایین، شکل ۴-۱۸ (الف) مقطع فرکانس ۱۵ هرتز به دست آمده توسط روش ST را نشان می‌دهد و شکل ۴-۱۸ (ب) همان مقطع بدست آمده با روش SSST را نشان می‌دهد. مناطق سایه فرکانس پایین به وضوح در هر دو بخش به نمایش گذاشته شده‌اند. با این حال بخش فرکانس ۱۵ هرتز با وضوح بسیار بالا که با استفاده از روش SSST به دست آمده است دو منطقه سایه فرکانس پایین را به وضوح از هم جدا کرده است، در حالی که در روش ST به عنوان یک منطقه واحد تشخیص داده می‌شوند. شکل ۴-۱۸ (ج) و (د) به ترتیب مقطع فرکانس ۳۰ هرتز به دست آمده توسط روش‌های ST و SSST را نشان می‌دهد. مناطق سایه فرکانس پایین با هر دو روش در بخش فرکانس ۳۰ هرتز وجود دارد اما با استفاده از روش SSST به

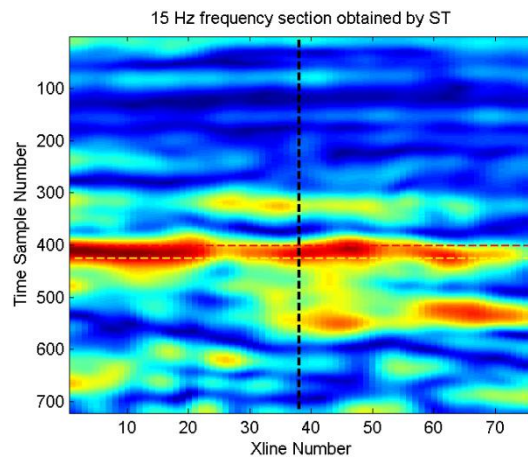
---

<sup>۱</sup> Castagna

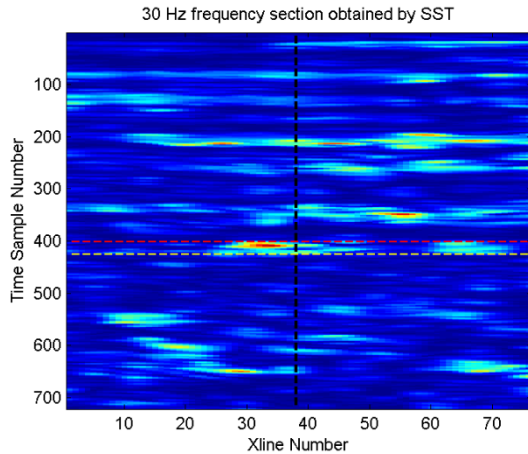
طور کارآمد از هم جدا و تصویر می‌شوند. مقطع فرکانس بالا ۴۵ هرتز به دست آمده توسط روش ST و SSST به ترتیب در شکل ۴-۱۸ (ن) و (و) نشان داده شده است، همانطور که پیش بینی می‌شود، برای مقطع‌هایی با فرکانس بالا هر دو روش ST و SSST هیچ ناهنجاری واضحی در مقطع‌هایی با فرکانس بالا را تشخیص نمی‌دهند.



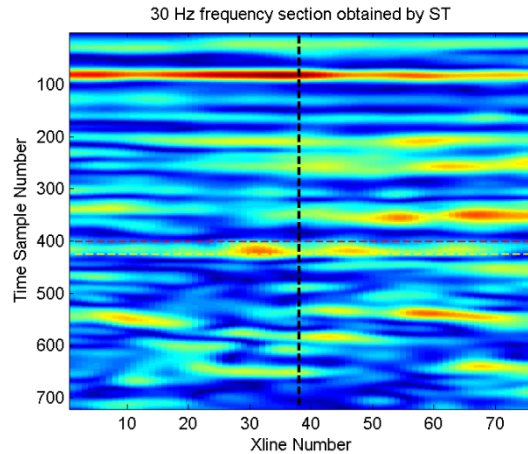
(ب)



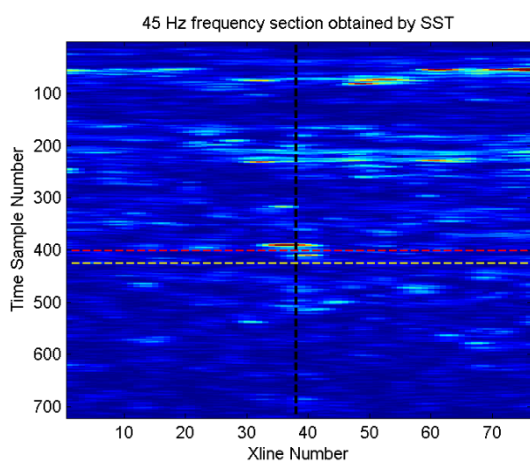
(الف)



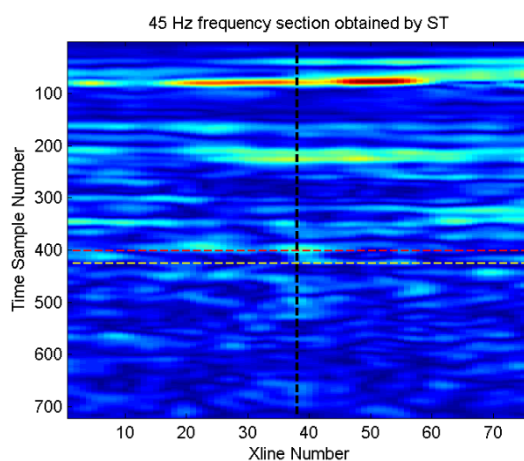
(د)



(ج)



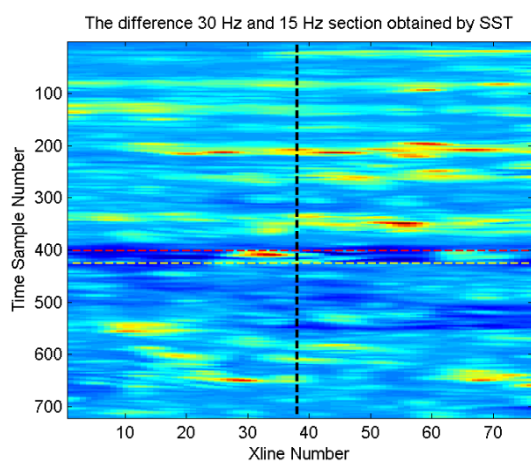
(و)



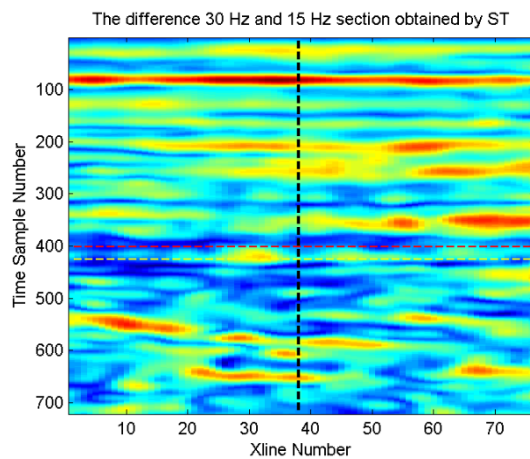
(ن)

شکل ۴-۱۸: مقطع‌های نشانگر تک فرکانس لرزه‌ای به دست آمده برای (الف) فرکانس ۱۵ هرتز در تبدیل ST، (ب) فرکانس ۱۵ هرتز در تبدیل SSST، (ج) فرکانس ۳۰ هرتز در تبدیل ST، (د) فرکانس ۳۰ هرتز در تبدیل SSST، (ن) فرکانس ۴۵ هرتز در تبدیل ST، (و) فرکانس ۴۵ هرتز در تبدیل SSST.

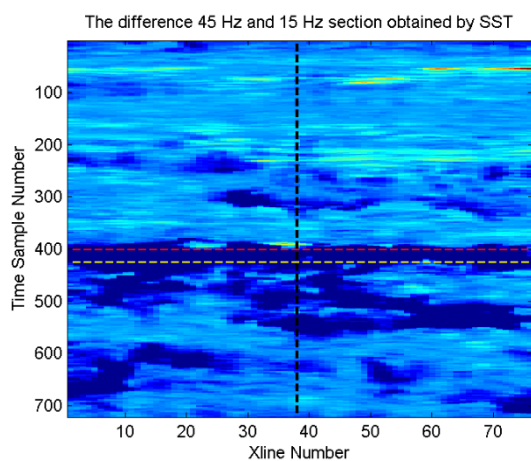
برای ارزیابی عملکرد بهتر روش SSST و کارایی بالاتر در شناسایی و جداسازی سازندهای لایه نازک گاز، مقاطع اختلاف بین تک فرکانس‌ها در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. شکل ۴-۱۹ (الف) و (ب) اختلافات بین تک فرکانس ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به دست آمده توسط روشهای ST و SST را نشان می‌دهد. بدیهی است که مقطع اختلاف برای فرکانس‌های ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به دست آمده با روش SSST به وضوح منطقه تجمع گاز به طور کارآمد نشان می‌دهد که از دو سازه گاز جدا شده است در حالی که برای نتایج ST نمی‌توان به راحتی آن را تشخیص داد. در شکل ۴-۱۹ (ج) و (د) اختلاف مقطع‌های فرکانسی ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به دست آمده با روشهای ST و SSST به ترتیب نشان داده شده‌اند. سازه‌های مخزن گاز که با روش SSST در اختلاف مقطع برای ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به دست آمده برجسته هستند. در شکل ۴-۱۹ (د) منطقه آنومالی پایین نشان دهنده تشکیل مخزن گاز است که در شکل ۴-۱۹ (ج) با روش ST قابل تشخیص نیست. بنابراین، می‌توان با استفاده از گروهی از نشانگرهای زمان - فرکانس مربوط به تجمع گاز که همگی با روش SSST بدست آمده‌اند به صورت گام به گام برای ترسیم کارآمد تشکیلات گاز و مناطق هدف در مخازن گاز به نتایج مطلوبی دست پیدا نمود.



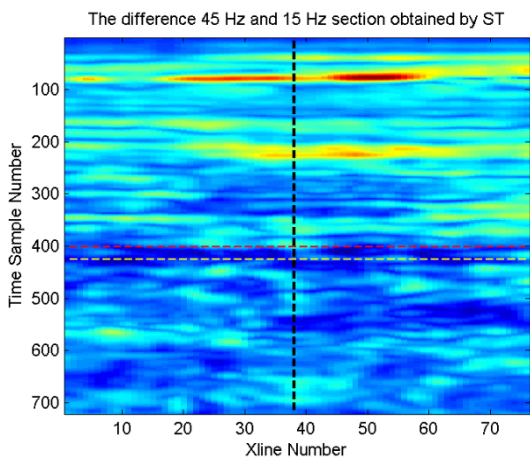
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۱۹: تفاوت برش برای (الف) ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به روش ST بدست آمده است، (ب) ۱۵ هرتز و ۳۰ هرتز به روش SSST بدست آمده است، (ج) ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به روش ST بدست آمده است، (د) ۱۵ هرتز و ۴۵ هرتز به روش SSST بدست آمده است.





## فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

- (۱) با آزمایش بر روی سیگنال‌های مختلف نشان داده شد که تبدیل SSST قادر است که نمایش زمان - فرکانس با تفکیک پذیری بهتری نسبت به تبدیل S استاندارد ارائه دهد. همچنین نشانگرهای زمان - فرکانس که با استفاده از روش SSST بدست آمده‌اند، می‌توانند به خوبی مخازن گاز لایه نازک، مناطق سایه کم فرکانس و تجمع گاز را شناسایی کرده و جدا کنند.
- (۲) مقایسه نتایج به دست آمده توسط روش‌های SSST و ST نشان داد که روش SSST وضوح بالاتری را در حوزه زمان - فرکانس فراهم می‌کند و به طور موثر انرژی پراکنده شده را در صفحه زمان - فرکانس متمرکز می‌کند.
- (۳) مقطع تک فرکانس، به ویژه برای مقادیر فرکانس پایین، مقطع تفاوت در فرکانس‌های پایین و بالا، دامنه لحظه‌ای و نشانگر فاکتور شیرینی به عنوان بهترین نشانگرهای زمان - فرکانس با استفاده از روش SSST برای ترسیم مخازن گاز انتخاب شدند.

## ۵-۲ پیشنهادها

- (۱) در این پایان‌نامه از روش تبدیل S فشرده شده همزمان استفاده شد که می‌توان از تبدیل‌های دیگر زمان - فرکانس مانند تبدیل موجک، تبدیل فوریه زمان کوتاه، تبدیل S تعمیم یافته نیز استفاده نمود و روش فشرده سازی همزمان را بر روی آنها اعمال نمود و عملکرد آنها را نیز در تحلیل زمان - فرکانس داده‌های لرزه‌ای بررسی کرد.
- (۲) روش‌های بازچینی شامل فشرده سازی همزمان (SST) و روش RM هستند که در این پایان‌نامه از روش فشرده سازی همزمان استفاده شد که می‌توان عملکرد روش RM را نیز در استخراج نشانگرهای زمان - فرکانس بررسی کرد.

۳) نشانگرهای زمان - فرکانس مختلفی وجود دارند که در این پایان نامه بررسی شدند. ترکیب این نشانگرها در قالب روش های مختلف مانند RGB شاید نتایج جالبی به همراه داشته باشد.

## مراجع

- [1] Gabor, D. (1946) "Theory of communication" Part 1: The analysis of information. *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, **93(26)**, 429-441.
- [2] Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., & Castagna, J. P. (2005) "Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform" *Geophysics*, **70(6)**, P19-P25.
- [3] Stockwell, R. G., Mansinha, L., & Lowe, R. P. (1996) "Localization of the complex spectrum: the S transform" *IEEE transactions on signal processing*, **44(4)**, 998-1001.
- [4] Martin, W., & Flandrin, P. (1985) "Wigner-Ville spectral analysis of nonstationary processes" *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **33(6)**, 1461-1470.
- [5] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ... & Liu, H. H. (1998) "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences*, **454(1971)**, 903-995.
- [6] Daubechies, I. (1996) "A nonlinear squeezing of the continuous wavelet transform based on auditory nerve models". *Wavelets in medicine and biology*, 527-546.
- [7] Wu, G., & Zhou, Y. (2018) "Seismic data analysis using synchrosqueezing short time Fourier transform". *Journal of Geophysics and Engineering*, **15(4)**, 1663-1672.
- [8] Daubechies, I., Lu, J., & Wu, H. T. (2011) "Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool". *Applied and computational harmonic analysis*, **30(2)**, 243-261.
- [9] Fourer, D., Auger, F., & Hu, J. (2015) "Reassigning and synchrosqueezing the Stockwell transform: Complementary proofs".
- [10] Liu, Y. (2010) "Local time-frequency transform and its application to ground-roll noise attenuation. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010". *Society of Exploration Geophysicists* (pp. 3711-3716).
- [11] Radad, M., Gholami, A., & Siahkoohi, H. R. (2015) "S-transform with maximum energy concentration: Application to non-stationary seismic deconvolution". *Journal of Applied Geophysics*, **118**, 155-166.
- [12] Herrera, R. H., Han, J., & van der Baan, M. (2014) "Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis". *Geophysics*, **79(3)**, V55-V64.
- [13] Liu, J., & Marfurt, K. J. (2007) "Instantaneous spectral attributes to detect channels". *Geophysics*, **72(2)**, P23-P31.
- [14] Alfred, H. (1910) "Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme". *Mathematische Annalen*, **69(3)**, 331-371.

- [15] Pinnegar, C. R., & Mansinha, L. (2003) "The S-transform with windows of arbitrary and varying shape". *Geophysics*, **68**(1), 381-385.
- [16] Auger, F., & Flandrin, P. (1995) "Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method". *IEEE Transactions on signal processing*, **43**(5), 1068-1089.
- [17] Tary, J. B., van der Baan, M., & Herrera, R. H. (2017) "Applications of high-resolution time-frequency transforms to attenuation estimation Q-estimation by high-resolution transforms". *Geophysics*, **82**(1), V7-V20.
- [18] Mousavi, S. M., & Langston, C. A. (2017) "Automatic noise-removal/signal-removal based on general cross-validation thresholding in synchrosqueezed domain and its application on earthquake data". *Geophysics*, **82**(4), V211-V227.
- [19] Chen, H., Lu, L., Xu, D., Kang, J., & Chen, X. (2017) "The synchrosqueezing algorithm based on generalized S-transform for high-precision time-frequency analysis". *Applied Sciences*, **7**(8), 769.
- [20] Huang, Z. L., Zhang, J., Zhao, T. H., & Sun, Y. (2015) "Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**(2), 817-825.
- [21] Huang, Z. L., Zhang, J., Zhao, T. H., & Sun, Y. (2015) "Synchrosqueezing S-transform and its application in seismic spectral decomposition". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**(2), 817-825.
- [۲۲] رداد م. (۲۰۱۹) "تحلیل زمان-فرکانس داده های لرزه ای با روش تبدیل S بازچینی شده برای آشکارسازی سایه های کم-فرکانس" پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، شماره ۲، دوره ۵، صفحه ۲۸۳-۲۹۳.
- [23] Mallat, S. (1999) "A wavelet tour of signal processing". *Elsevier*.
- [24] Sivakumar, S., & Nedumaran, D. (2001) "Separable Windowed Discrete Time-Frequency Signal Analysis and Processing Techniques for ECG Arrhythmia Signals". *technology*, **12**, 14.
- [25] McFADDEN, P. D., Cook, J. G., & Forster, L. M. (1999) "Decomposition of gear vibration signals by the generalised S transform". *Mechanical systems and signal processing*, **13**(5), 691-707.
- [26] Stanković, L. (2001) "A measure of some time-frequency distributions concentration". *Signal Processing*, **81**(3), 621-631.
- [27] Sejdić, E., Djurović, I., & Jiang, J. (2007) "A window width optimized S-transform". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, **2008**, 1-13.
- [28] Sahu, S. S., Panda, G., & George, N. V. (2009, March) "An improved S-transform for time-frequency analysis". In *2009 IEEE International Advance Computing Conference* (pp. 315-319).
- [29] Todorov, T. I., & Margrave, G. F. (2009) "Variable factor S-transform seismic data analysis". *CREWES Research Report*, **21**.
- [۳۰] رداد م. (۱۳۸۸) "پایان نامه دکتری: بهبود تفکیک زمان فرکانس تبدیل S با منظم سازی تنک و کاربرد آن در واهمامیخت و نوفه زدایی لرزه ای" موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- [31] Auger, F., Flandrin, P., Lin, Y. T., McLaughlin, S., Meignen, S., Oberlin, T., & Wu, H. T. (2013) "Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: An overview". *IEEE Signal Processing Magazine*, **30**(6), 32-41.
- [32] Koder, K., Gendrin, R., & Villedary, C. (1978) "Analysis of time-varying signals with small BT values". *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **26**(1), 64-76.
- [33] Hainsworth, S. W., & Macleod, M. D. (2003) "Time frequency reassignment: A review and analysis".
- [34] Thakur, G., & Wu, H. T. (2011) "Synchrosqueezing-based recovery of

- instantaneous frequency from nonuniform samples”. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, **43**(5), 2078-2095.
- [35] Djurović, I., & Stanković, L. (2004) “An algorithm for the Wigner distribution based instantaneous frequency estimation in a high noise environment”. *Signal Processing*, **84**(3), 631-643.
- [36] Hu, Y., Chen, H., Qian, H., Zhou, X., Wang, Y., & Lyu, B. (2020) “A high-precision time–frequency analysis for thin hydrocarbon reservoir identification based on synchroextracting generalized S-transform”. *Geophysical Prospecting*, **68**(3), 941-954.
- [37] Castagna, J. P., Sun, S., & Siegfried, R. W. (2003) “Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons”. *The leading edge*, **22**(2), 120-127.
- [38] Huang, Y., Zheng, X., Duan, Y., & Luan, Y. (2018) “Robust time-frequency analysis of seismic data using general linear chirplet transform”. *Geophysics*, **83**(3), V197-V214.
- [39] Li, S., & Rao, Y. (2020) “Seismic low-frequency amplitude analysis for identifying gas reservoirs within thinly layered media”. *Journal of Geophysics and Engineering*, **17**(1), 175-188.
- [40] Nikoo, A., Kahoo, A. R., Hassanpour, H., & Saadatnia, H. (2016) “Using a time-frequency distribution to identify buried channels in reflection seismic data”. *Digital Signal Processing*, **54**, 54-63.
- [41] Radad, M., Gholami, A., & Siahkoohi, H. R. (2016) “single-frequency seismic attribute”. *Journal of seismic exploration*, **25**, 11-25.
- [42] Radad, M. (2018) “Application of Single-Frequency Time-Space Filtering Technique for Seismic Ground Roll and Random Noise Attenuation”. *Journal of the Earth and Space Physics*, **44**(4), 41-51.
- [43] Margrave, G. F., Lamoureux, M. P., & Henley, D. C. (2011) “Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data”. *Geophysics*, **76**(3), W15-W30.
- [44] Zhou, H. L., Wang, C. C., Marfurt, K. J., Jiang, Y. W., & Bi, J. X. (2016) “Enhancing the resolution of non-stationary seismic data using improved time–frequency spectral modelling”. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **205**(1), 203-219.
- [45] Alaei, N., Roshandel Kahoo, A., Kamkar Rouhani, A., & Soleimani, M. (2018) “Seismic resolution enhancement using scale transform in the time-frequency domain”. *Geophysics*, **83**(6), V305-V314.
- [46] Steeghs, P., & Drijkoningen, G. (2001) “Seismic sequence analysis and attribute extraction using quadratic time-frequency representations”. *Geophysics*, **66**(6), 1947-1959.
- [47] Chabyshova, E., & Goloshubin, G. (2014) “Seismic modeling of low-frequency “shadows” beneath gas reservoirs”. *Geophysics*, **79**(6), D417-D423.
- [48] van der Baan, M., Fomel, S., & Perz, M. (2010) “Nonstationary phase estimation A tool for seismic interpretation”. *The Leading Edge*, **29**(9), 1020-1026.
- [49] Sinha, S., Routh, P., & Anno, P. (2009) “Instantaneous spectral attributes using scales in continuous-wavelet transform”. *Geophysics*, **74**(2), WA137-WA142.
- [50] Ebrahimi, P., Razavi, S. M., Ismaeili, S., & Azarpour, M. (2013) “Gas-Chimney detection in 3D seismic by neural network”. *Petroleum science and technology*, **31**(11), 1188-1195.
- [51] Mosayebi, A., Angaji, M. T., & Khadiv-Parsi, P. (2016) “The effect of temperature

- on the interfacial tension between crude oil and ethoxylated nonylphenols”. *Petroleum Science and Technology*, **34(15)**, 1315-1322.
- [52] Shen, P. (2012) “An RTM based automatic migration velocity analysis in image domain”. In SEG Technical Program Expanded Abstracts **2012**. *Society of Exploration Geophysicists*. (pp. 1-5).
  - [53] Habibnia, B., & Momeni, A. (2012) “Reservoir characterization in Balal oil field by means of inversion, attribute, and geostatistical analysis methods”. *Petroleum science and technology*, **30(15)**, 1609-1618.
  - [54] Soleimani, M. (2013) “Simulation of petroleum exploration based on a conceptual decision model: taking the Dezful Embayment in southwestern Iran as an example”. *Petroleum Exploration and Development*, **40(4)**, 476-480.
  - [55] Li, Z., & Guo, X. (2007) “Predicting the distribution of thin bed reservoirs by broad frequency band seismic”. *Applied Geophysics*, **4(2)**, 118-126.
  - [56] Roden, R., Smith, T. A., Santogrossi, P., Sacrey, D., & Jones, G. (2017) “Seismic interpretation below tuning with multiattribute analysis”. *The Leading Edge*, **36(4)**, 330-339.

# Abstract

Time Frequency seismic attributes are widely used in the interpretation of seismic data for various exploratory purposes including the identification of subsurface structures as well as areas containing hydrocarbons. However, the accuracy of these attributes is a function of the time frequency analysis method applied to the data. In seismic signals, various time frequency transforms have been used to obtain the appropriate time and frequency analysis. These include short-time Fourier transform, S transform, and wavelet transform, each of which has its advantages and disadvantages. The S transform has been accepted by many researchers in frequency time analysis over the years. However, due to Heisenberg uncertainty principle, this transform is not able to provide acceptable time frequency analysis. So, many methods have been proposed to increase the resolution of this transform. One of these methods is the synchrosqueezing method. This method, as a post-processing method, does not have the problem of uncertainty principle and is able to transfer the energy dissipated in the frequency time plane, which has caused the reduction of temporal and frequency resolution, to the main temporal and frequency position. This technique is performed on different time frequency analysis methods including S transform.

In this thesis, the aim is to investigate the performance of synchrosqueezing S transform in time frequency analysis of seismic data in order to extract different time-frequency attributes. The attributes obtained from this method are used in the field of gas detection and low frequency shadows on a seismic data set. The time frequency attributes used in this method are: instantaneous amplitude, instantaneous peak frequency, sweetness factor, C80 frequency, instantaneous average frequency, instantaneous frequency bandwidth, average quality factor and iso-frequency sections. The results show that due to the high time frequency analysis by the synchrosqueezing S transform method, the resulting seismic attributes also have a higher ability to detect low frequency shadows than the standard S transform attributes.

**Keywords:** time frequency representation, S transform, synchrosqueezing, seismic attributes, gas.





Shahrood University of Technology  
faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.S. Thesis in Exploration Seismology

# Seismic attributes generation by synchrosqueezed S-transform

Soheil Paksima

## **Supervisors:**

Dr. Mohammad Radad

Dr. Amin Roshandel Kahoo

## **Advisor:**

Dr. Mehrdad Soleimani Monfared

February, 2021