

## تضعیف امواج ریلی در حوزه زمان - مقیاس

رضا گودرزی\* و حمیدرضا سیاهکوهی\*

\*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۴۶-۱۴۱۵۵

پذیرش مقاله: ۸۲/۴/۲۵

دریافت مقاله: ۸۱/۴/۳۰

### چکیده

یکی از نوفه‌های همدوس موجود در رکوردهای لرزه‌های حاصل از عملیات لرزه‌نگاری در خشکی امواج ریلی با دامنه زیاد و بسامد (فرکانس) غالب کم است. روش‌های متداول برای تضعیف این امواج عبارت‌اند از صافی‌های بسامدی و انواع صافی‌های سرعتی همچون  $f-k$ ، که عموماً بر اساس تبدیل فوریه عمل می‌کنند. از معایب این روش‌های پردازشی این است که سیگنال یا تریس لرزه‌ای را پایا (دارای محتوای بسامدی ثابت) فرض می‌کنند، در حالی که تریس‌های لرزه‌ای به لحاظ محتوای بسامدی، متغیر با زمان یا ناپایا هستند.

در این بررسی به جای استفاده از روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه، از روش دیگری به نام تبدیل موجک برای تضعیف امواج ریلی استفاده شد. مزیت اصلی تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه این است که تریس لرزه‌ای را پایا فرض نمی‌کند، علاوه بر آن تبدیل موجک قادر است اطلاعات بسامدی تریس لرزه‌ای را به صورت موضعی در حوزه زمان - مقیاس (یا به واسطه‌ای زمان - بسامد) مشخص سازد. عملکرد تبدیل موجک بر اساس تفکیک تریس لرزه‌ای به توابع پایه‌ای است که دارای بازه محدودی در زمان و بسامد هستند. تبدیل موجک تریس‌های یک رکورد لرزه‌ای را به صورت انفرادی مورد بررسی قرار می‌دهد، در حالی که صافی‌های بسامدی تریس‌های رکورد را یکجا بررسی می‌کنند. تبدیل موجک یک تریس نمایش ضرایب تبدیل موجک آن تریس به صورت تابعی از زمان و مقیاس است، با توجه به اینکه مقیاس مرتبط با بسامد موجک است، پس می‌توان گفت با انجام تبدیل موجک، موقعیت زمانی تمام مولفه‌های بسامدهای تشکیل دهنده آن تریس را به دست خواهیم آورد.

در این تحقیق الگوریتم لازم برای انجام تبدیل موجک بر روی تریس‌های لرزه‌ای تدوین شد، سپس با توجه به ضرایب تبدیل موجک به دست آمده، صافی برای تضعیف امواج ریلی طراحی شد و در نهایت کارایی این صافی در تضعیف امواج ریلی با کارایی صافی‌های بسامدی میان‌گذر و  $f-k$  مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، هنگامی که امواج ریلی در رکورد لرزه‌ای دارای پراکندگی کمی هستند، تأثیر امواج ریلی از نظر زمانی روی تریس‌های لرزه‌ای تقریباً یکسان خواهد بود و بنابراین صافی‌های بسامدی و  $f-k$  نسبت به تضعیف امواج ریلی خوب عمل می‌کنند. اگر محیط از لحاظ ساختار سرعتی همگن نباشد، امواج ریلی در رکورد لرزه‌ای به صورت پراکنده خواهند بود و در این حالت صافی‌های بسامدی و  $f-k$  به خوبی تبدیل موجک در تضعیف این امواج عمل نمی‌کنند.

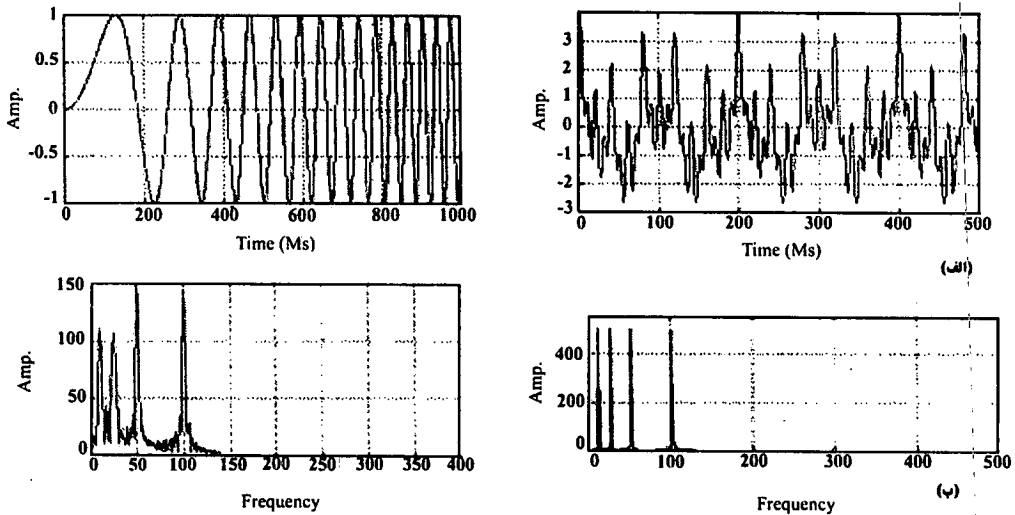
کلیدواژه‌ها: تبدیل موجک، ضرایب تبدیل موجک، حوزه مقیاس - زمان، امواج ریلی

### ۱ مقدمه

معمولاً در عمل داده‌های لرزه‌ای در حوزه زمان - مکان‌اند، یعنی نمایشی از دامنه بر حسب زمان را در دستگاه مختصاتی به نام زمان - مسافت ارائه می‌دهند. این نوع نمایش داده‌ها همیشه بهترین نوع نمایش نخواهد بود به خصوص برای استخراج اطلاعاتی که کاربردهای عملی دارند، در بیشتر موارد اطلاعات مورد نیاز در محتوی بسامدی (فرکانسی) و فازی سیگنال قرار دارند.

تبدیل فوریه، اطلاعات بسامدی و فازی داده‌های لرزه‌ای را در اختیار قرار می‌دهد، ولی نمی‌تواند موقعیت زمانی آنها را مشخص

کند. این سؤال مطرح می‌شود که آیا لازم است اطلاعات بسامدی و زمانی مربوط به داده‌های لرزه‌ای را با هم در اختیار داشته باشیم؟ جواب بستگی به نوع کاربرد و نیز نوع داده استفاده شده دارد. در لرزه‌نگاری سطحی در خشکی، امواج ریلی نوفه‌های حاصل از چشمه انرژی‌اند که نسبت به امواج بازتابی بسامد غالب کمتری دارند. از آنجا که این امواج در یک بازه زمانی مشخص روی رکورد لرزه‌ای ظاهر می‌شوند، به منظور تضعیف این امواج تعیین موقعیت زمانی مولفه‌های بسامدی تشکیل دهنده آن می‌تواند



شکل ۱. الف) نمایش دو سیگنال پایا و ناپایا با محتوای بسامدی ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز (سمت راست سیگنال پایا و سمت چپ سوپ حاصل از یک ارتعاشگر به عنوان سیگنال ناپایا) ب) نمایش تبدیل فوریه دو سیگنال پایا و ناپایای (قسمت الف) (اوپنهایم و همکاران، ۱۹۹۷).

سیگنال‌های پایا فرض کرد؟ به عبارت دیگر آیا می‌توان یک سیگنال ناپایا را به چند سیگنال پایا تقسیم نمود؟

ابزاری سودمند باشد.

جواب مثبت است، نوعی تبدیل فوریه وجود دارد که روی قسمتی از یک سیگنال (در زمان) به کار می‌رود، این روش به پنجره کردن سیگنال معروف است (اوپنهایم و همکاران، ۱۹۹۷). حاصل این کار سیگنال ورودی را در دو بعد زمان و بسامد نشان می‌دهد. این روش می‌تواند اطلاعاتی را راجع به اینکه در چه زمانی کدام بسامدها ثبت شده‌اند به ما بدهد. با این حال باز هم در به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر محدودیت‌هایی داریم و آن عبارت از محدودیت در تعیین طول پنجره زمانی در تبدیل فوریه زمان کوتاه است. ابعاد پنجره انتخابی معمولاً بستگی به سیگنال مورد مطالعه دارد، اگر قسمتی از سیگنال که آن را از نظر محتوای بسامدی ثابت فرض کردیم خیلی کوچک باشد، پنجره ما نیز باریک‌تر خواهد بود. این نوع تفکیک و تحلیل سیگنال در واقع نوعی از تبدیل فوریه است که در اصطلاح تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) نام دارد و تفاوت آن با تبدیل فوریه معمولی در این است که طول پنجره در تبدیل فوریه برابر با طول

## ۲ تبدیل فوریه و تبدیل فوریه زمان کوتاه

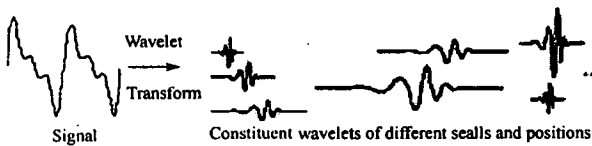
تبدیل فوریه یک سیگنال پایا با مؤلفه‌های بسامدی  $f_1$  تا  $f_n$  با تبدیل فوریه سیگنال ناپایا که مؤلفه‌های بسامدی آن هم از  $f_1$  تا  $f_n$  است، یکی است (شکل ۱). تبدیل فوریه در تفکیک تریس لرزه‌ای به امواج سینوسی یا کسینوسی تشکیل دهنده آن بسیار مؤثر عمل می‌کند، ولی متأسفانه پس از این تفکیک اطلاعات زمانی از بین می‌رود. بدین معنی که وقتی به تبدیل فوریه یک سیگنال نگاه شود غیر ممکن است که بتوان گفت این مؤلفه‌ها در چه زمانی روی سیگنال مورد نظر قرار دارند. چون تریس‌های لرزه‌ای ناپایا هستند، به عبارت دیگر خواص بسامدی و فازی آنها متغیر با زمان است، بنابراین نمی‌توان از تبدیل فوریه برای تشخیص این خواص استفاده کرد (پاپولیس، ۱۹۶۲ و بریگام، ۱۹۹۹).

حال این سؤال مطرح می‌شود که آیا می‌توان رفع این مشکل سیگنال ناپایا را در بخش‌های کوچک‌تری به عنوان

قدرت تفکیک سیگنال در حیطه بسامد به همان نسبت کم خواهد بود (مثل یک تابع ضربه). همچنین هر گاه مؤلفه بسامدی را دقیقاً در حوزه بسامد بتوان معین کرد، در حوزه زمان قدرت تفکیک کم خواهد بود (مثل یک موج سینوسی یا کسینوسی با بسامد معین). به همین خاطر در روش STFT کاهش طول زمانی پنجره محدودیت دارد. چون در یک سیگنال ناپایا بسامدها با تغییر زمان عوض می‌شوند لذا برای دستیابی به جواب مطمئن به پنجره‌ای با طول متغیر نیازمندیم. یعنی باید پنجره‌های با طول متغیر برای تفکیک هر چه بهتر مؤلفه‌های بسامد با زمان یا نمایش زمان - بسامد یک سیگنال طراحی کنیم. راه حل مشکل، استفاده از تبدیل موجک است.

۳ تبدیل موجک

همان‌طور که ذکر شد در تبدیل فوریه، سیگنال به موج‌های سینوسی که دارای بسامدهای متفاوت هستند تفکیک می‌شود. به همین نحو در تبدیل موجک، سیگنال به موجک‌هایی که شکل انتقال یافته یا مقیاس شده‌ای از یک موجک اصلی (یا مادر) هستند تفکیک می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. تفکیک سیگنال به موجک‌های مادر تشکیل دهنده آن با استفاده از ضرائب تبدیل موجک (چویی، ۱۹۹۲ب).

هنگام اجرای تبدیل موجک حاصل کورولیشن سیگنال و تابع موجک در کل طول زمانی سیگنال محاسبه می‌شود (چویی، ۱۹۹۲ب).

الف) تبدیل موجک پیوسته

رابطه تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$c(\text{scale, position}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(\text{scale, position, } t) dt \quad (2)$$

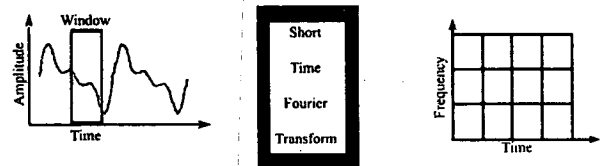
سیگنال است ولی در تبدیل فوریه زمان کوتاه، طول پنجره دارای ابعاد محدودی است، و فقط از بخشی از سیگنال که در داخل پنجره قرار دارد تبدیل فوریه گرفته می‌شود (نواب و کواتیری، ۱۹۸۹).

از نظر ریاضی تبدیل فوریه زمان کوتاه را می‌توان به صورت زیر نشان داد (چویی، ۱۹۹۲ا).

$$\text{STFT}_{(x)}^{(w)}(t, f) = \int_t x(t) \cdot w^*(t-t') \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (1)$$

که در آن  $x(t)$  سیگنال اصلی،  $w(t)$  تابع پنجره، \* مزدوج مختلط و  $t'$  مقدار جابه‌جایی پنجره در هر قدم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این معادله چیزی نیست جز تبدیل فوریه سیگنال  $x(t)$  که در تبدیل فوریه تابع پنجره  $w(t)$  ضرب شده است. ضرائب تبدیل فوریه زمان کوتاه برای هر  $f$  و  $t$  محاسبه می‌شود.

شکل ۲ مفهوم تبدیل فوریه زمان کوتاه را به‌خوبی نمایش می‌دهد. معمولاً در عمل به هنگام اجرای تبدیل فوریه زمان کوتاه طول پنجره زمانی انتخاب شده برای تمام طول سیگنال یکسان است، همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود قدرت تفکیک زمان - بسامد در کل طول زمانی سیگنال تغییر نکرده است، و این ضعف اصلی تبدیل فوریه زمان کوتاه، (یعنی چگونگی انتخاب عرض تابع پنجره) است.



شکل ۲. نمایش تبدیل فوریه زمان کوتاه روی یک سیگنال. طول پنجره زمانی به‌کار گرفته شده در طول کل زمان سیگنال ثابت است (چویی، ۱۹۹۲ ب).

معمولاً عدم قطعیتی در تعیین هم‌زمان مؤلفه‌های بسامدی تشکیل دهنده تریس و موقعیت زمانی آن مؤلفه‌ها در تریس مورد نظر وجود دارد. هر گاه قدرت تفکیک زمانی سیگنال زیاد باشد،

تابع موجک بایستی تابعی نوسانی باشد.

ب) نظم یا قاعده: این شرط ایجاب می‌کند که موجک مادر به صورت موضعی نرم و متمرکز (هم در زمان و هم در بسامد) باشد. این شرط مفهوم جدیدی را مطرح می‌سازد و آن صفر بودن گشتاور است. هر گاه تابع موجک،  $M$  بار مشتق‌پذیر باشد در آن صورت:

$$\int x^m \psi(x) dx = 0 \quad m \in [0, M] \quad (۶)$$

پارامتر مقیاس در تبدیل موجک همان مفهوم مقیاس در نقشه‌ها را دارد. معمولاً در مقیاس‌های بزرگ کلیات تریس لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد، ولی در مقیاس‌های کم با دید جزئی‌تر به تریس لرزه‌ای نگاه می‌شود. در مورد بسامد نیز به همین ترتیب، در بسامدهای کم اطلاعات کلی از سیگنال گرفته می‌شود و در بسامد زیاد، اطلاعات جزئی سیگنال مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقیاس‌بندی یک ابزار ریاضی است که در اینجا منظور از آن، همان باز شدن و یا فشردن شدن موجک در زمان است. مقیاس بزرگ مطابق با باز شدن یا کشیده شدن موجک و مقیاس کوچک به معنی فشردن شدن موجک است، از آنجا که فشردگی موجک مطابق با زیاد بودن بسامد غالب آن و نیز بازشدگی یا کشیدگی موجک مطابق با کم بودن بسامد غالب آن است، بنابراین بسامد غالب و مقیاس یک موجک با هم در ارتباط هستند. به این معنی که مقیاس بزرگ مطابق با بسامد غالب کم و مقیاس کوچک، مطابق با بسامد غالب زیاد است.

در شکل ۴ تغییرات ضرایب تبدیل موجک با زمان و مقیاس برای یک سیگنال نشان داده شده است. محور  $x$  در این شکل نشان‌دهنده تغییرات زمان است و محور  $y$  تغییرات مقیاس را نشان می‌دهد. مقادیر ضرایب تبدیل موجک نیز با تغییر رنگ در صفحه  $x$ - $y$  نمایش داده شده‌اند، به طوری که ضرایب بزرگ‌تر به صورت روشن‌ترند.

نمایش ضرایب تبدیل موجک را می‌توان به صورت سه‌بعدی نیز نشان داد، به طوری که محور  $x$  تغییرات زمان، محور  $y$  تغییرات

که در آن  $f$  و  $c$  به ترتیب تابع سیگنال و ضرایب موجک‌اند و  $\psi$  موجک مادر است. از حاصلضرب ضرایب موجک در توابع موجک (مقیاس شده و انتقال یافته در زمان)، موجک‌های تشکیل دهنده سیگنال (یا توابع پایه) حاصل می‌شوند (شکل ۳). تبدیل موجک پیوسته را می‌توان به صورت ضرب داخلی سیگنال اصلی در موجک مادر دانست. که در این صورت رابطه تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{CWT}_X^\psi(\tau, s) = \int X(t) \psi_{\tau, s}^*(t) dt \quad (۳)$$

که در آن

$$\psi_{\tau, s}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (۴)$$

که در آنها  $\psi(t)$  تابع پایه یا موجک مادر،  $X(t)$  سیگنال مورد نظر،  $\tau$  مقدار انتقال زمانی و  $s$  اندازه مقیاس تابع پایه است.  $\psi^*(t)$  معرف تابع موجک با مقیاس  $s$  است که به اندازه  $\tau$  در طول سیگنال انتقال یافته است (مالات، ۱۹۸۹).

یک واقعیت مهم در مورد توابع موجک این است که خود تبدیل هیچ مطلوبیتی در مورد شکل آنها ایجاد نمی‌کند و این تفاوت عمده تبدیل موجک با سایر تبدیل‌ها است. ولی دو شرط وجود دارد که موجک‌ها بایستی آنها را برآورده سازند (کایزر، ۱۹۹۵):

الف) مقبولیت

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (۵)$$

که در آن  $\psi(\omega)$  تبدیل فوریه  $\psi(t)$  است. از این شرط دو نتیجه حاصل می‌شود:

۱- تبدیل موجک معکوس شونده است، یعنی به کمک توابعی که مجذور آنها جمع‌پذیرند می‌توان هر سیگنال دلخواهی را بازسازی نمود.

۲- تابع بایستی با ازای  $\omega = 0$  دارای مقدار صفر باشد. بنابراین مقدار میانگین تابع صفر خواهد بود و این به معنی آن است که

در عمل، سیگنال اولیه  $x[n]$  از دو صافی عبور داده می‌شود که عبارت‌اند از صافی‌های نیم باند بالاگذر  $g[n]$  و پایین‌گذر  $h[n]$  و این یک سطح از عملیات تفکیک سیگنال با تبدیل موجک گسسته را تشکیل می‌دهد. روی خروجی حاصل از اثر صافی نیم باند پایین‌گذر، دوباره دو صافی بالاگذر و پایین‌گذر دیگر عمل می‌کنند و این عمل تا رسیدن به سطح مورد نظر ادامه می‌یابد.

$$Y_{high}[k] = \sum_n x[n]g[-n + 2k] \quad (7)$$

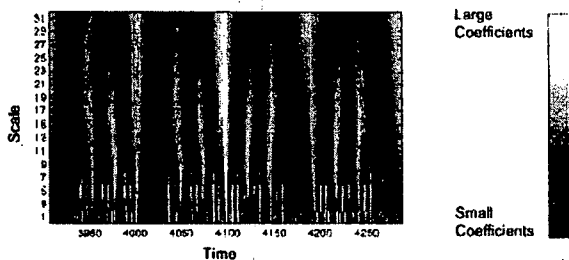
$$Y_{low}[k] = \sum_n x[n]h[-n + 2k] \quad (8)$$

که در آنها،  $Y_{high}[k]$  و  $Y_{low}[k]$  خروجی‌های صافی‌های بالاگذر و پایین‌گذرند.

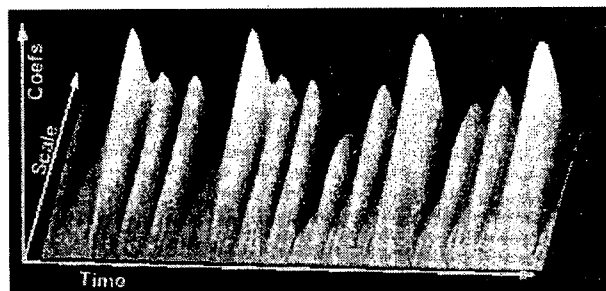
بعد از اجرای عملیات، افزایش فاصله نمونه‌برداری با ضریب ۲، (عمل تفکیک سیگنال) دقت تفکیک زمانی نصف می‌شود، ولی دقت تفکیک بسامدی دو برابر خواهد شد، و باند بسامدی سیگنال در اینجا نصف باند بسامدی سیگنال قبلی است. این عملیات در هر سطح با صافی کردن و دو برابر نمودن فاصله نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌ها را (یا دقت تفکیک در زمان را) نصف می‌کند و در نتیجه باند در برگرفته مؤلفه‌های بسامدی نصف (یا دقت تفکیک بسامد دو برابر) می‌شود. به همین خاطر مؤلفه‌های اصلی بسامدی در سیگنال در تبدیل موجک گسسته با دامنه بالا مشخص می‌شوند. اختلاف این تبدیل با تبدیل فوری همان‌طور که پیش از این بیان شد در امکان ارائه موقعیت زمانی مؤلفه‌های بسامدی است. دو صافی لازم برای افزایش فاصله نمونه‌ها از هم، از روابط ۷ و ۸ به دست می‌آیند.

چنان که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در تبدیل موجک گسسته در مراحل تفکیک و بازسازی سیگنال از صافی‌های مشابه استفاده شده است، با این تفاوت که نحوه عملکرد آنها برعکس یکدیگر است (برای جزئیات بیشتر به گودرزی، ۱۳۸۱ و کوهن و همکاران، ۱۹۹۲ رجوع شود). برای سیگنال  $x[n]$  فرمول بازسازی برای هر سطح به صورت زیر است.

مقیاس و محور Z نشان‌دهنده تغییرات ضرایب تبدیل موجک باشد (شکل ۵).



شکل ۴. تغییرات ضرایب تبدیل موجک با زمان و مقیاس در یک سیگنال نشان داده شده است، محور X در این شکل نشان دهنده تغییرات زمان است و محور Y تغییرات مقیاس را نشان می‌دهد. مقادیر ضرایب تبدیل موجک نیز با تغییر رنگ در صفحه X-Y نمایش داده می‌شوند (چوبی، ۱۹۹۲ا).

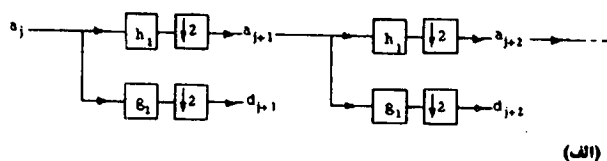


شکل ۵. نمایش سه‌بعدی تغییرات ضرایب تبدیل موجک با زمان و مقیاس، محور X تغییرات زمان، محور Y تغییرات مقیاس و محور Z نشان دهنده تغییرات ضرایب تبدیل موجک است (چوبی، ۱۹۹۲ا).

### (ب) تبدیل موجک گسسته

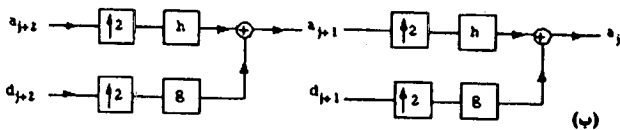
با توجه به اینکه امروزه داده‌های لرزه‌ای به صورت رقمی است و رایانه‌های قوی در دسترس قرار دارد، بنابراین لازم است که از تبدیلات موجک گسسته استفاده شود. تبدیل موجک گسسته در واقع تجزیه تریس لرزه‌ای در باندهای مختلف بسامدی (یا در مقیاس‌های مختلف) است. در تبدیل موجک گسسته، دو دسته تابع مدنظرند، توابع مرتبط با مقیاس و توابع مرتبط با بالاگذر مادر، که به ترتیب مربوط به صافی‌های پایین‌گذر و بالاگذر هستند. تفکیک سیگنال به باندهای بسامدی مختلف، با صافی‌های پایین‌گذر و بالاگذر صورت می‌گیرد (دایچیژ، ۱۹۸۸).

**Decomposition**



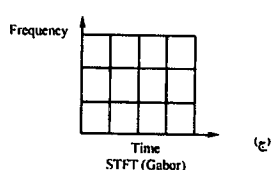
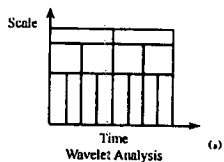
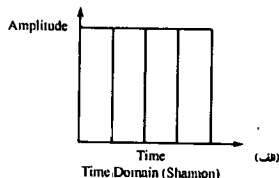
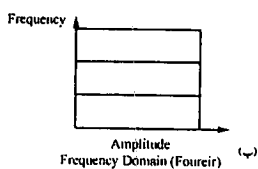
(الف)

**Reconstruction**



(ب)

شکل ۶. نمایش مراحل تفکیک (الف) و بازسازی (ب) سیگنال با استفاده از صافی‌های بسامدی بالاگذر و پایین‌گذر (دایبیز، ۱۹۹۲).



شکل ۷. نمایشی از قدرت تفکیک زمان و بسامد. (الف) نمایش سیگنال در حوزه زمان، هیچگونه تفکیک بسامدی نمی‌توان داشت. (ب) حوزه فوری، دقت تفکیک زمانی صفر است. (ج) نمایش سیگنال با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه، آنالیز زمان و بسامد سیگنال را داریم ولی دقت تفکیک زمان و بسامد در همه بازه‌های در نظر گرفته شده یکسان است. (د) در حیطه موجک، متناسب با تغییرات بسامد بازه زمانی (یا مقیاس) نیز تغییر می‌کند بدین صورت که در بسامدهای بالا طول بازه کوچک‌تر و در بسامدهای کم طول آن بزرگ‌تر است (کویفمن و همکاران، ۱۹۹۲).

ریلی دارای طول موج بزرگ‌تر و دامنه بیشتری نسبت به سایر امواج هستند. سرعت و دامنه امواج ریلی بستگی به وضعیت لایه‌های سطحی دارد، بنابراین انتظار می‌رود ویژگی آنها به‌خاطر متفاوت بودن شرایط لایه‌های سطحی در طول پروفیل لرزه‌ای متفاوت باشد. مراحل به‌کار رفته در این بررسی برای تضعیف امواج ریلی از

$$X[n] = \sum (Y_{high}[k]g[-n+2k]) + (Y_{low}[k]h[-n+2k]) \quad (۹)$$

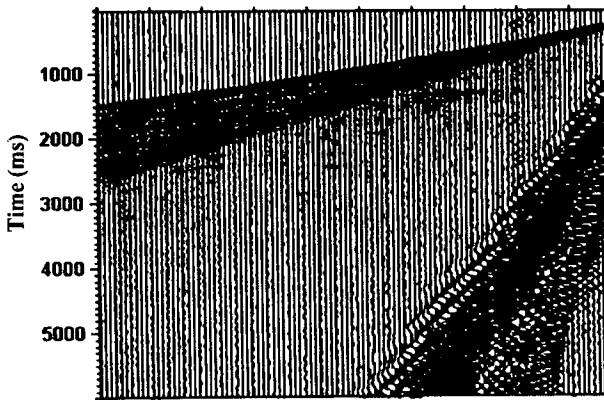
۴ مزیت تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوری

چنان که گفته شد در تبدیل فوری نوع زمان کوتاه، تابع پنجره دارای عرض ثابتی است. ولی در تبدیل موجک اگر بخواهیم آن با تبدیل فوری زمان کوتاه مقایسه کنیم، اندازه این پنجره متغیر است، به این صورت که در محدوده بسامدهای کم، عرض پنجره بیشتر است و در محدوده بسامدهای زیاد این پنجره دارای عرض کمتری است. پس می‌توان گفت تبدیل موجک در واقع یک نوع تبدیل فوری زمان کوتاه با طول پنجره متغیر است، به طوری که دارای قدرت تفکیک بهتری نسبت به تبدیل فوری زمان کوتاه است و مشکل تبدیل فوری زمان کوتاه را هم ندارد.

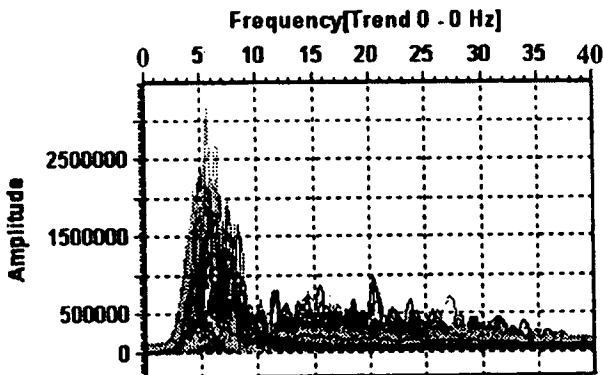
در شکل ۷ نمایشی از قدرت تفکیک زمان و بسامد در حالت‌های نمایش زمانی، بسامدی، فوری زمان کوتاه و تبدیل موجک آورده شده است. همان‌طوری که در این شکل دیده می‌شود در نمایش سیگنال در حوزه زمان (الف) هیچگونه تفکیک بسامدی نمی‌توان داشت، و برعکس در حوزه فوری (ب) دقت تفکیک زمانی صفر است، در نمایش سیگنال با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه (ج) آنالیز زمان و بسامد سیگنال را داریم ولی دقت تفکیک زمان و بسامد در همه بازه‌های در نظر گرفته شده یکسان است، و بالاخره در حیطه موجک (د) متناسب با تغییرات بسامد بازه زمانی نیز تغییر می‌کند، بدین صورت که در بسامدهای زیاد طول پنجره (یا مقیاس) کوچک‌تر و در بسامدهای کم، طول پنجره بزرگ‌تر است.

۵ تضعیف امواج ریلی با استفاده از تبدیل موجک

در عملیات لرزه‌نگاری خشکی، نوفه‌های حاصل از چشمه انرژی (همچون موج ریلی) باعث پوشانده شدن امواج بازتابی می‌شوند. بنابراین لازم است با استفاده از صافی‌های مناسب این نوفه‌ها را از رکوردهای لرزه‌ای حذف کنیم. چنان که گفته شد معمولاً امواج



شکل ۸. رکورد چشمه مشترک واقعی مشکل از ۹۶ تریس که هر تریس از ۱۵۰۱ نمونه با نرخ نمونه برداری ۴ میلی ثانیه تشکیل شده است. این رکورد تا زمان ۶۰۰۴ میلی ثانیه ثبت شده است. در این شکل به خاطر همگن بودن محیط امواج سطحی غیر پراکنده بوده و به طور خطی روند یکنواختی دارند.



شکل ۹. طیف فرکانسی رکورد نشان داده شده در شکل ۸ با توجه به شکل بیشترین دامنه در محدوده فرکانس ۳ تا ۸ هرتز قرار دارند، که مربوط به امواج ریلی می باشد.

بین مقیاس های ۱۶ تا ۶۴ و در بازه زمانی ۱۲۰۰ تا ۶۰۰۴ میلی ثانیه قرار گرفته است. بنابراین برای حذف امواج ریلی باید در این فاصله زمانی ضرایب موجک مقیاس های ۱۶ تا ۶۴ حذف شود و دوباره تریس با باقیمانده ضرایب بازسازی شود. موجک های به کار رفته در این بررسی از نوع ارتوگونال (کوهن و همکاران، ۱۹۹۲) است که توابع موجک و مقیاس دارند. در این مطالعه از موجک های متفاوتی استفاده شد که بررسی نتایج آنها نشان می دهد، موجک کوپفلت مرتبه ۵ در ارائه اطلاعات مربوط به

رکوردهای لرزه ای با استفاده از تبدیل موجک به شرح زیر است:  
۱- به دست آوردن محدوده بسامدی امواج ریلی با استفاده از طیف فوریه.

۲- به دست آوردن ضرایب موجک پیوسته با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به منظور تشخیص موقعیت زمانی امواج ریلی با توجه به نمایش مقیاس - زمان رکورد لرزه ای.

۳- انتخاب بازه زمانی برای انجام تبدیل موجک گسسته مطابق با موقعیت امواج ریلی در تریس لرزه ای (با استفاده از بند ۲).

۴- انتخاب موجک مادر.

۵- انتخاب مراحل تفکیک تریس با استفاده از تبدیل موجک گسسته.

۶- به دست آوردن ضرایب موجک گسسته.

۷- حذف پاره ای از ضرایب موجک در بازه زمانی انتخاب شده.

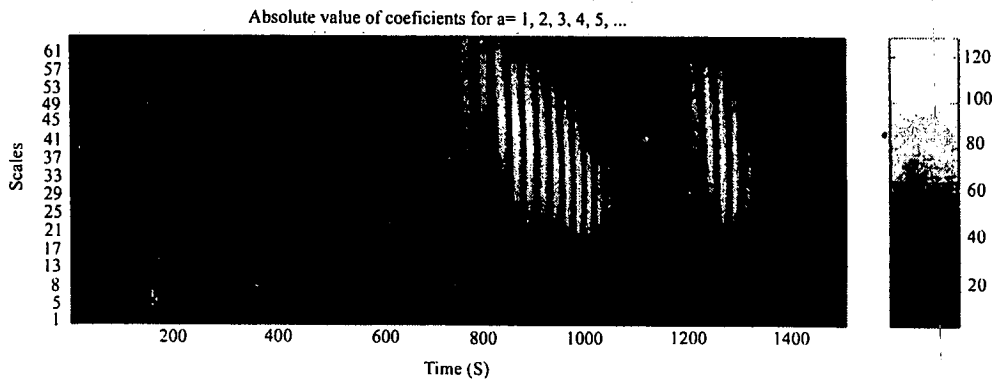
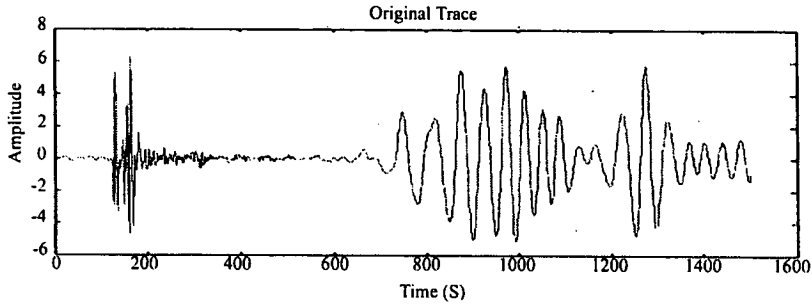
۸- بازسازی تریس با باقی مانده ضرایب تبدیل موجک در بازه زمانی انتخاب شده.

همان طور که پیش از این هم اشاره شد مراحل فوق به طور مجزا بر روی تک تک تریس های موجود در یک رکورد لرزه ای اعمال می شود.

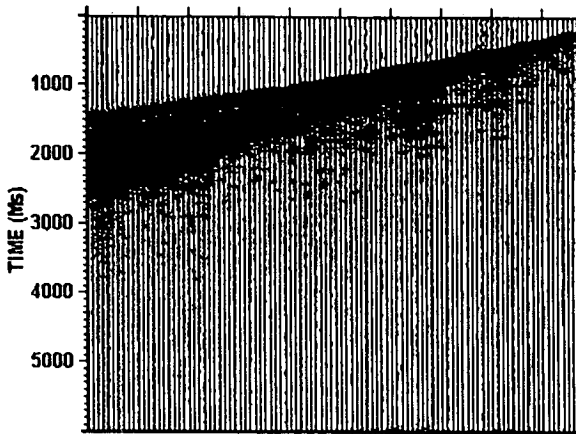
شکل ۸، رکورد چشمه مشترک واقعی (بدون هیچ پردازشی)

در این بررسی را، نشان می دهد. این رکورد دربر گیرنده ۹۶ تریس است و هر تریس از ۱۵۰۱ نمونه با فاصله نمونه برداری ۴ میلی ثانیه تشکیل شده است. طول زمان رکورد ۶۰۰۴ میلی ثانیه است. چنان که در این شکل مشاهده می شود، امواج سطحی از پراکنندگی به نسبت کمتری برخوردارند و مدهای مختلف به راحتی قابل ردیابی اند. در شکل ۹ طیف بسامدی همان رکورد نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ مشاهده می شود که بیشترین دامنه در این رکورد در محدوده بسامد ۳ تا ۸ هرتز قرار دارد و مربوط به امواج ریلی است.

در شکل ۱۰ تبدیل موجک روی یک تریس انتخابی از رکورد فوق تا مقیاس ۶۴ انجام شده است. محدوده امواج ریلی



شکل ۱۰. نمایش تبدیل موجک تریس شماره ۸۰ از رکورد شکل ۸، محدوده امواج ریلی بین مقیاس‌های ۱۶ تا ۶۴ و در بازه زمانی ۱۲۰۰ میلی‌ثانیه تا ۶۰۰۴ میلی‌ثانیه است، موجک به کار رفته کویفلت مرتبه ۵ است.



شکل ۱۱. رکورد چشمه مشترک پس از حذف امواج ریلی توسط تبدیل موجک.

اکنون رکورد لرزه‌ای واقعی را (بدون هیچ پردازشی) در نظر می‌گیریم (شکل ۱۴). ساختار سرعتی حاکم بر منطقه مورد مطالعه باعث شده است تا امواج ریلی با پراکندگی به نسبت بیشتری در روی رکورد مشاهده شوند. این رکورد چشمه مشترک متشکل از

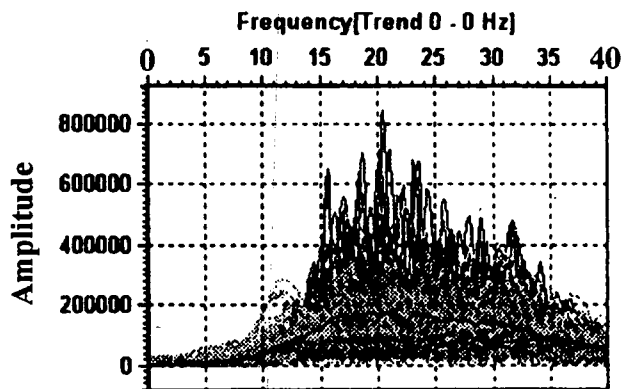
توزیع زمانی مؤلفه‌های بسامدی موجود در تریس (شکل ۱۸) بهترین جواب را داده است.

شکل ۱۱ رکورد چشمه مشترک شکل ۸ را پس از حذف امواج ریلی با تبدیل موجک و شکل ۱۲ طیف بسامدی رکورد مذکور را پس از حذف امواج ریلی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین دامنه در محدوده بسامدی ۱۵ تا ۳۰ هرتز است که به داده‌های لرزه‌ای غیر از امواج ریلی مربوط است.

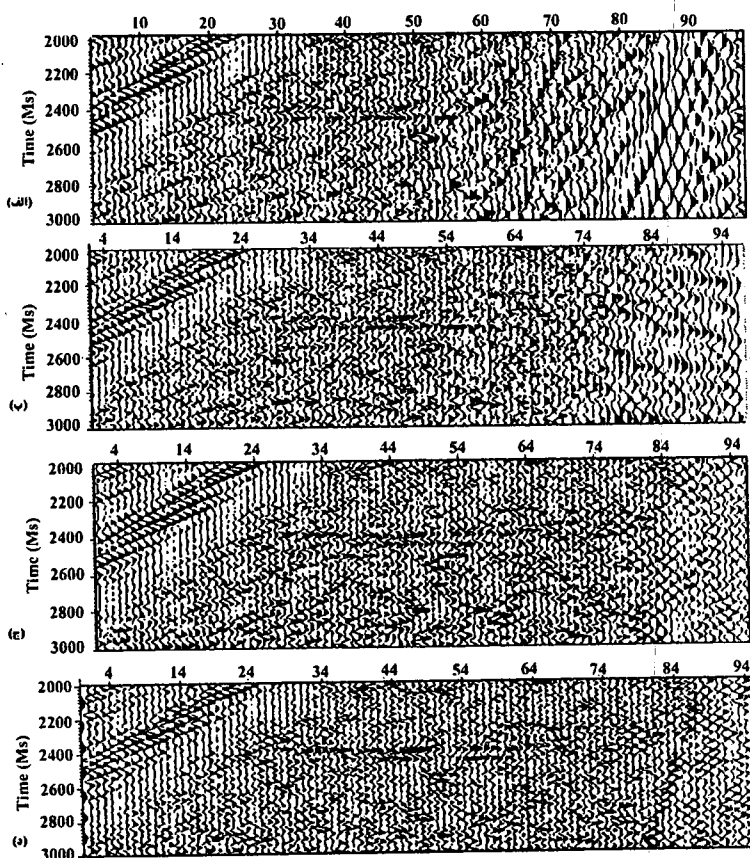
در شکل ۱۳ - الف، قسمتی از رکورد لرزه‌ای همراه با امواج ریلی نشان داده شده است. پوشانده شدن بازتاب‌های قوی در زمان ۲۴۰۰ میلی‌ثانیه با امواج ریلی به وضوح مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳ - ب، تضعیف امواج ریلی با صافی  $f-k$  در شکل ۱۳ - ج، تضعیف امواج ریلی با صافی میان‌گذر با بسامدهای قطع ۱۲/۱۵/۳۵/۴۰ هرتز و در شکل ۱۳ - د، تضعیف امواج ریلی با تبدیل موجک نشان داده شده است.



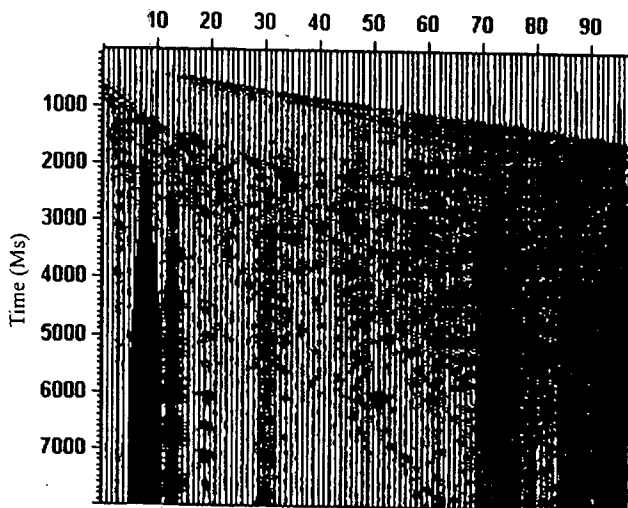
۹۶ تریس با فاصله نمونه گیری ۴ میلی ثانیه بوده و طول رکورد ۸۰۰۴ میلی ثانیه است. طیف بسامدی این رکورد در شکل ۱۵ نشان داده شده است، به استثنای دامنه قوی در ۵۰ هرتز که مربوط به برق شهر است. در طیف این رکورد، بیشترین مقدار دامنه در محدوده بسامدی ۳ تا ۱۲ هرتز قرار دارد. با توجه به طیف بسامدی رکورد برای تضعیف امواج ریلی از صافی بسامدی میان گذر با بسامدهای قطع ۱۵/۲۰/۵۰/۶۰ هرتز استفاده شد. تبدیل موجک یکی از تریس های این رکورد تا مقیاس ۳۲ گرفته شد و مشاهده گردید که از زمان ۱۰۰۰ میلی ثانیه به بعد و در مقیاس های ۱۶ تا ۳۲



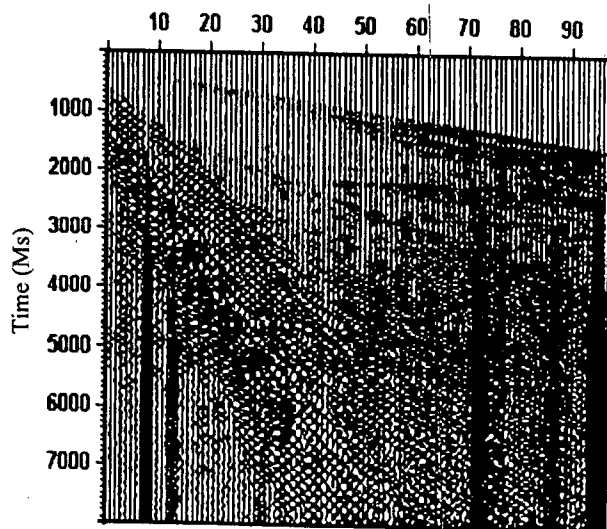
شکل ۱۲. طیف بسامدی رکورد پس از حذف امواج ریلی. بیشترین مقدار دامنه در محدوده بسامدی ۱۵ تا ۳۰ هرتز و مربوط به داده های لرزه ای غیر از امواج ریلی است.



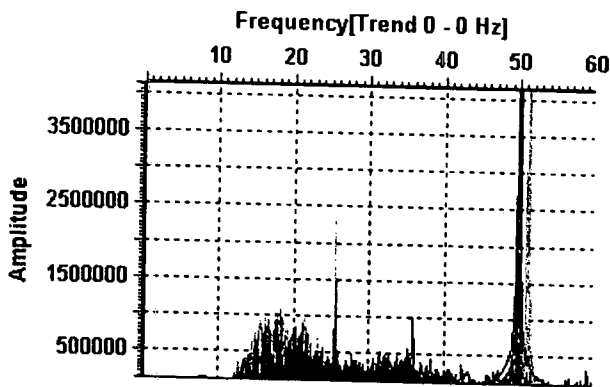
شکل ۱۳. رکورد شکل ۸، فقط در فاصله زمانی ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی ثانیه مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل الف، رکورد خام همراه با امواج ریلی دیده می شود که در زمان ۲۴۰۰ میلی ثانیه بازتاب های قوی در آن مشاهده می شود. در شکل ب، تضعیف امواج ریلی با صافی  $f-k$  صورت گرفته و در شکل ج، امواج ریلی با صافی میان گذر ۱۲/۱۵/۳۵/۴۰ هرتز تضعیف شده اند، و بالاخره در شکل د، تضعیف امواج ریلی با تبدیل موجک انجام گرفته است.



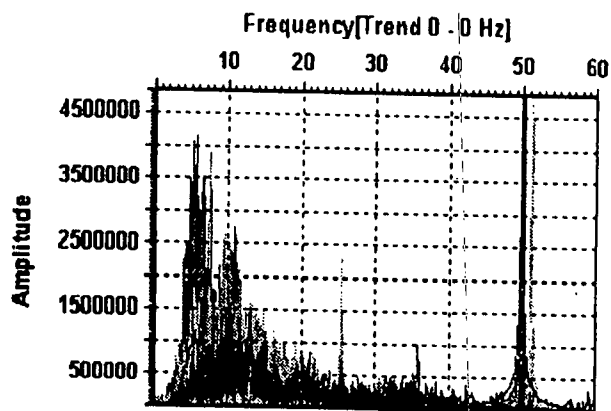
شکل ۱۶. رکورد چشمه مشترک پس از تضعیف امواج ریلی با تبدیل موجک، موجک مورد استفاده دایبیز مرتبه ۱۰ است.



شکل ۱۴. رکورد چشمه مشترک متشکل از ۹۶ تریس با نرخ نمونه‌گیری ۴ میلی‌ثانیه و با طول رکورد ۸۰۰۴ میلی‌ثانیه می‌باشد. بخاطر ساختار سرعتی محیط، امواج ریلی پراکندگی بیشتری دارند.



شکل ۱۷. طیف بسامدی رکورد پس از حذف امواج ریلی نمایش داده شده است. با توجه به شکل بیشترین مقدار دامنه در محدوده بسامدی ۱۵ تا ۴۰ هرتز و نشان دهنده وجود داده‌های لرزه‌ای بازتابی است.



شکل ۱۵. طیف بسامد رکورد شکل ۱۴، بیشترین مقدار دامنه در محدوده بسامدی ۱۲ تا ۳ هرتز است.

می‌شوند)، به جز موجک دایبیز مرتبه اول که همان موجک هار است، بقیه موجک‌های این خانواده دارای رابطه تحلیلی نیستند (دایبیز، ۱۹۹۲).

رکورد چشمه مشترک مورد بررسی پس از تضعیف امواج ریلی به کمک تبدیل موجک در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در شکل ۱۷ طیف بسامدی رکورد پس از حذف امواج ریلی نمایش داده شده است. با توجه به این شکل بیشترین مقدار دامنه (به استثنای ۵۰ هرتز) در محدوده بسامدی ۱۵ تا ۴۰ هرتز

بزرگ‌ترین ضرایب موجک قرار دارند. لذا با توجه به طیف بسامد امواج ریلی، می‌توان این ضرایب را به امواج ریلی نسبت داد. بنابراین برای تضعیف امواج ریلی در این رکورد ضرایب ۱۶ تا ۳۲ موجک برای تریس‌ها از زمان ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه به بعد حذف شد. لازم به اشاره است که موجک مورد استفاده در اینجا دایبیز مرتبه ۱۰ است (شکل ۱۸). موجک دایبیز از نوع متعامد است و خانواده آن دارای ده عضو است (معمولاً با لفظ مرتبه خوانده

می‌شود. بسامدهای قطع صافی میان‌گذر استفاده شده در اینجا ۱۲/۱۵/۴۵/۵۰ هرتز است.

یکی از علت‌های اصلی ارجحیت تبدیل موجک به صافی میان‌گذر این است که تبدیل موجک مؤلفه‌های بسامدی مورد نظر را فقط در محدوده حضور امواج ریلی حذف می‌کند. ولی صافی میان‌گذر مؤلفه‌های بسامدی مورد نظر را در کل رکورد لرزه‌ای حذف می‌کند و این امکان وجود دارد که در پاره‌ای از موارد باعث حذف سیگنال‌های مورد نیاز نیز شود.

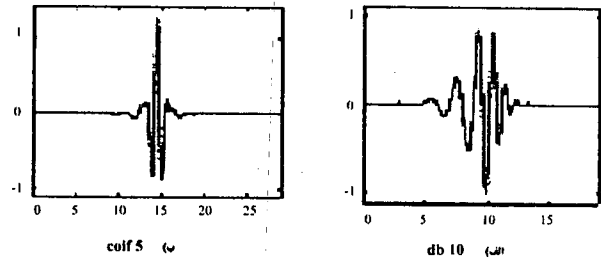
۶ نتایج

هنگامی که امواج ریلی موجود در رکورد لرزه‌ای به‌خاطر شرایط حاکم بر زمین‌شناسی منطقه پراکنده نشده باشند، توزیع یکنواختی روی تریس‌های لرزه‌ای خواهند داشت. بنابراین صافی‌های بسامدی و صافی حوزه  $f-k$  نسبت به تضعیف امواج ریلی در این شرایط خوب عمل می‌کنند. اگر محیط از لحاظ ساختار سرعتی طوری باشد که امواج ریلی در رکورد لرزه‌ای پراکنندگی بیشتری داشته باشد در این حالت صافی‌های بسامدی میان‌گذر و صافی‌های سرعتی حوزه  $f-k$  به خوبی تبدیل موجک در تضعیف این امواج عمل نمی‌کنند.

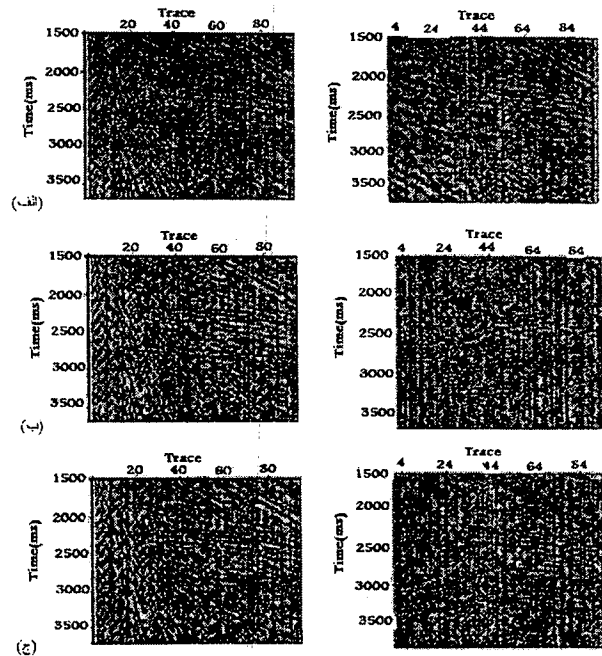
نتایج نشان داد که تحلیل موجک نسبت به دیگر روش‌های پردازشی دارای دو مزیت اصلی است:

الف) چون تحلیل موجک به‌طور تریس به تریس در یک رکورد لرزه‌ای عمل می‌کند، بنابراین تحلیل یک رکورد لرزه‌ای با تبدیل موجک دقیق‌تر است. لازم به یادآوری است که مدت زمان تبدیل موجک روی یک رکورد لرزه‌ای تقریباً برابر با زمان لازم برای انجام صافی‌های بسامدی است.

ب) تبدیل موجک قادر است اطلاعات بسامدی یک تریس را به‌صورت موضعی مشخص کند، به عبارت دیگر تبدیل موجک قادر به مشخص کردن موقعیت زمانی هر مؤلفه از بسامد است. در بازسازی مجدد تریس لرزه‌ای با تبدیل موجک گسسته معکوس تعداد نمونه‌ها و همچنین نرخ نمونه‌گیری مؤثرند، به‌طوری که



شکل ۱۸. نمایش موجک‌های به‌کار گرفته شده در این تحقیق برای اعمال صافی تبدیل موجک به منظور حذف امواج ریلی، شکل (الف) نمایش موجک دایبیز مرتبه ۱۰ و شکل (ب) نمایش موجک کویفلت مرتبه ۵ است.



شکل ۱۹. الف) تضعیف امواج ریلی با صافی  $f-k$  (سمت راست رکورد صافی شده و سمت چپ رکورد اصلی)، ب) تضعیف امواج ریلی با صافی میان‌گذر ۱۲/۱۵/۴۵/۵۰ هرتز (سمت راست رکورد صافی شده و سمت چپ رکورد اصلی) و ج) تضعیف امواج ریلی با تبدیل موجک، (سمت راست رکورد صافی شده و سمت چپ رکورد اصلی).

و مربوط به داده‌های لرزه‌ای غیر از امواج ریلی است. در شکل‌های ۱۹ (الف)، (ب) و (ج) تضعیف امواج ریلی به ترتیب با صافی‌های  $f-k$ ، میان‌گذر و تبدیل موجک با جزئیات بیشتری (محدوده زمانی بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌ثانیه) نشان داده شده است. امواج بازتابی در زمان‌های ۲۱۰۰ و ۲۷۵۰ میلی‌ثانیه مشاهده

Chui, C. K., 1992a, Wavelets :A tutorial in theory and applications, Academic Press.

Chui, C. K., 1992b, An introduction to wavelets, Academic Press.

Cohen, A., Daubechies, I. and Feaveau, J. C., 1992, Biorthogonal basis of compactly supported wavelets, *commun. Pure Appl. Math.*, **45**, 485-560.

Coifman, R. R., Meyer, Y. and Wickerhouser, M. V., 1992, Wavelet analysis and signal processing, in wavelets and their applications, M.B. Ruskai etal. (Eds.), pp. 153-178, Jones and Bartlett.

Daubechies, I., 1988, Ortonormal basis of compactly supported wavelets: *Commun. Pure Appl.Math.*, **41**, 909-996.

Daubechies, I., 1992, Ten lectures on wavelets: CBMS-NSF Ser. Appl., Soc. Ind. Appl. Math., **61**.

Kiser, G., 1995, A friendly guide to wavelets. Department of Mathematics, University of Massachusetts, ISBN: 3-7643-3711-7

Mallat , S., 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation , *IEEE Patern Anal. And Machine Intell.*, **11**, 7, 674-693.

Nawab, S., and Quatieri, T., 1989, Short- time Fourier transform: in Lim, J., and Oppenheim, A., Eds., *Advanced topics in signal processing*: Prentice-Hall , Inc., 289-337.

Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., and Nawab, H., 1997, *Signal and System*: Prentice-Hall, Inc.

Populis, A., 1962, *The Fourier integral and its applications*: McGraw-Hill Press, New York, 318 p.

برای اطلاعات بسامد زیاد، فاصله نمونه‌گیری زیاد و برای بسامدهای کم نرخ نمونه‌گیری کمتری لازم دارد. در تضعیف امواج ریلی با تبدیل موجک باید به دو نکته مهم توجه کرد:

الف) تابع موجک مادر باید کاملاً فشرده انتخاب شود، به طوری که بیشترین بسامد تریس را در مقیاس یک داشته باشد، و همچنین دارای قدرات تفکیک زمانی لازم باشد.

ب) عمل تبدیل موجک باید تا مرحله‌ای از تفکیک سیگنال پیش رود که محدوده بسامدهای امواج ریلی را در بر داشته باشد. با توجه به اینکه تریس لرزه‌ای در اصل یک سری زمانی متشکل از موجک لرزه‌ای با محتوای بسامدی متفاوت است، در نتیجه تبدیل موجک به عنوان ابزاری سودمند می‌تواند نقش مهمی در پردازش داده‌های لرزه‌ای دو و سه بعدی داشته باشد.

منابع

گودرزی، ر.، ۱۳۸۱، تضعیف امواج سطحی با استفاده از تبدیل موجک و مقایسه آن با فیلترهای فرکانسی میان‌گذر و  $f-k$ ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

Brigham, E. O., 1999, *Fast Fourier transform and applications*: Prentice-Hall, Inc.