



افزایش توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تبدیل موجک گسسته مختلط

علیرضا گودرزی^{۱*} و فرهاد ملائی^۲

۱- استادیار، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۳۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: a.goudarzi@kgut.ac.ir

واژگان کلیدی

تبدیل موجک
توان تفکیک
داده‌های لرزه‌ای
تبدیل هیلبرت

چکیده

توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای به دلیل اثرات جذب فرکانسی، تضعیف دامنه و تداخل امواج کاهش می‌یابد و به عنوان یک چالش اساسی در مطالعات لرزه‌نگاری مدنظر است. افزایش توان تفکیک با روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد؛ اما مهم‌ترین و شناخته شده ترین روش، روش واهمامیخت است؛ که به عنوان یک روش متداول برای افزایش توان تفکیک، با تقویت یا بازیابی فرکانس‌های بالا منجر به فشرده‌سازی می‌شود. این مقاله روشی بر پایه تبدیل هیلبرت را در فضای موجک گسسته مختلط ارائه می‌دهد. نخست داده‌ها با تبدیل موجک گسسته مختلط تجزیه می‌شوند؛ سپس با استفاده از پوش هیلبرت محاسبه شده ضرایب موجک در تمامی مقیاس‌ها تقویت شده و با انجام وارون تبدیل موجک و افزایش فرکانس‌های بالای موجود در داده‌ها بدون هیچ تقریب یا تخمینی، داده با فرکانس بالا به صورت فشرده ارائه می‌شود. یکی از بارزترین نتایج این روش کاهش اعوجاج نتایج نسبت به دیگر روش‌های موجود در این زمینه است. نتایج حاکی از برتری روش ارائه شده نسبت به روش تبدیل موجک گسسته غیر کاهشی مشابه است؛ زیرا تبدیل موجک گسسته مختلط اثرات جانبی کمتری را نسبت به روش غیر کاهشی دارد و دلیل این امر ارتقای زمان-فرکانس بالاتر نسبت به روش مذکور است. نکته حائز اهمیت دیگر، ضروریات محاسباتی است؛ به نحوی که اعمال روش در حیطه موجک گسسته مختلط با محاسبات کمتری مواجه است. زیرا فرآیند کاهش با فاکتور ۲ در آن صورت می‌پذیرد؛ در حالی که روش تبدیل موجک گسسته غیر کاهشی هیچ کاهش را در ضرایب ارائه نمی‌دهد؛ اما روش تبدیل موجک گسسته مختلط نسبت به روش تبدیل موجک گسسته مرسوم افزونگی بالاتری دارد؛ زیرا از دو موجک بهره می‌برد که به صورت همزمان داده‌ها را آنالیز می‌کنند.

۱- مقدمه

داده‌های لرزه‌ای را می‌توان بر اساس مدل هم‌امیخت موجک چشمه با سری بازتاب زمین معرفی نمود. ضریب بازتاب زمین می‌تواند اطلاعات قابل‌قبولی از چگونگی حضور بازتابنده‌ها در زیر سطح زمین ارائه دهد و یکی از اهداف پردازش داده‌های لرزه‌ای آماده‌سازی داده‌ها برای تفسیر قابل‌قبول است (Yilmaz, 2001).

محققان روش‌های متعددی را برای این منظور ارائه داده‌اند؛ که بیشتر به دو خانواده روش‌های وارون سازی و یا روش‌های مبتنی بر طیف در فضای دیگری غیر از زمان تعلق دارند. مهم‌ترین روش افزایش توان تفکیک روش و هم‌امیخت است؛ که اثر موجک را به طرق مختلف از داده برداشته و سری بازتاب زمین را ارائه می‌دهد، اما کارایی این روش تابع ملاحظات عدیده‌ای است: مانند نوفه و یا نوع چشمه. بنابراین دستیابی به نتیجه مطلوب بدون آسیب به سیگنال ممکن نیست (Yilmaz, 2001).

از دسته روش‌های طیفی، برخی از روش‌ها بر پایه فوریه مرسوم هستند. تبدیل فوریه به روش مرسوم توانایی درک ناپایایی سیگنال را ندارد. از طرفی روش‌های ارائه شده در حیطه فوریه نیز تحت تأثیر عواملی مانند پنجره، نوفه‌های حاشیه‌ای و پدیده گیبس هستند. از طرف دیگر نشت فرکانسی در تبدیل فوریه به هر صورت امری است اجتناب‌ناپذیر؛ حتی اگر از نوفه‌های حاشیه‌ای به عنوان اثرات جانبی صرف‌نظر شود. البته تبدیل موجک بر این محدودیت‌ها غلبه کرده و در زمینه‌های متعدد پردازشی داده‌های ژئوفیزیکی به سرعت در حال گسترش است. چندین روش برای افزایش توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است و از آن جمله استفاده از روش مقیاس کردن زمان تبدیل فوریه (علایی و همکاران، ۱۳۹۵) و بررسی فیلتر وارون کیفیت برای داده‌های VSP (Zhang et al., 2015) اشاره کرد.

روشندل و غلتاشی (Roshandel and Gholtaishi, 2015) توان تفکیک زمانی را با استفاده از تبدیل زمان-فرکانس لگاریتمی بهبود بخشیدند.

روسو و همکاران (Rusu et al., 2011) روش تبدیل هیلبرت را بر پایه انتگرال‌های اساسی قاعده کوشی بازنویسی نموده‌اند. زو و همکاران (Zhou et al., 2004) بر پایه روش تبدیل موجک گسسته پایا، سعی در بازیابی و ارتقای توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای داشته‌اند؛ که شباهت بسیاری با فضای تبدیل موجک گسسته غیر کاهشی مطرح شده در تحقیق پیش رو دارد. روت و سوریندر (Rawat and Surinder, 2010) نتوری مطرح شده توسط زو و همکارانش (Zhou et al., 2004) را توسعه داده و با استفاده از مقیاس‌های با فرکانس پایین سعی در تخمین و تکمیل ضرایب در مقیاس‌های فرکانس بالای تبدیل موجک گسسته پایا کردند. فرنر و همکارانش (Ferner et al., 2011) با استفاده از تبدیل موجک گسسته با فاکتور کیفیت تنظیم‌پذیر توان تفکیک داده‌ها را افزایش دادند؛ ولی تاکنون تبدیل

موجک مختلط مورد استفاده قرار نگرفته است.

روش تبدیل موجک مختلط گسسته یا CWT^1 توسط کینگسبوری (Kingsbury, 2001) ارائه شده و توسط گودرزی و همکاران (۲۰۱۴) در نوفه‌زدایی لرزه‌ای پیاده شده است؛ که نتایج آن معرف و مبین ارتقای زمان-فرکانس نسبت به روش‌های متداول در حیطه مذکور است.

این نوع تبدیل موجک بهتر از تبدیل‌های مشابه می‌تواند سیگنال را تجزیه کرده و ویژگی‌های ناپایایی سیگنال لرزه‌ای را مدنظر قرار دهد. همچنین تعداد معدودی از مقیاس‌ها را به فرم گسسته ارائه می‌دهد؛ که منجر به کاهش محاسبات نسبت به روش تبدیل موجک غیر کاهشی استفاده شده توسط ملائی (۱۳۹۲) می‌گردد.

تبدیل هیلبرت یک روش بسیار شناخته شده جهت ارائه سیگنال تحلیلی در زمینه پردازش داده‌هاست؛ که سال‌هاست مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آن دسته کاربردها در زمینه میدان پتانسیل به تحقیقات پینار (Pinar, 1985) و راو و همکارانش (Rao et al., 1982) می‌توان اشاره کرد.

در این رابطه محققان روش‌های زیادی برای ارائه رابطه بهره-فاز در حیطه فرکانسی ارائه کرده‌اند. یکی از این روش‌ها که در فضای هیلبرت به کار می‌رود، روابط بود (Bode) است؛ که توسط روسو و همکارانش (Rusu et al., 2011) و اندرسون و گرین (Anderson and Green, 1988) مورد استفاده قرار گرفت. البته عمده استفاده از تبدیل هیلبرت در کاربردهای ژئوفیزیکی مبتنی بر به دست آوردن معادلات بیشتر با پارامترهای ساختاری مشابه با استفاده از گرادیان‌های مختلط است (Akgun, 2000). حافظ (Hafez, 2009) از ریشه‌ها و نقاط تقاطع مشترک آنومالی و گرادیان‌های مختلط جهت حل پارامترهای ساختاری استفاده کرده است.

آخرین تحقیقات در زمینه افزایش توان تفکیک در حیطه موجک فرکانس‌های پایین و بالا را در مقیاس‌های پایین گذر و بالا گذر به یکدیگر مرتبط ساخته و فقدان این محتوای فرکانسی را در مقیاس‌های نظیر ممکن می‌سازد (Rawat and Surinder, 2010). عمده کاستی این نوع روش‌ها نشت نوفه از مقیاس‌های مختلف به یکدیگر است؛ به نحوی که الگوریتم به شدت به نوفه حساس بوده و نیازمند ملاحظات بیشتری است. روش مطرح شده که مبنای آن تلفیقی از تبدیل موجک گسسته و محاسبه پوش هیلبرت در هر مقیاس است؛ برای نخستین بار توسط ملائی (۱۳۹۲) ارائه گردید. این روش نیازی به تخمین مقیاس‌ها از یکدیگر ندارد؛ بلکه با استفاده از وجود فرکانس‌های بالاتر در برخی مقیاس‌ها و تقویت آن‌ها منجر به افزایش سطح دامنه این فرکانس‌ها و درنهایت فشرده‌سازی بیشتر

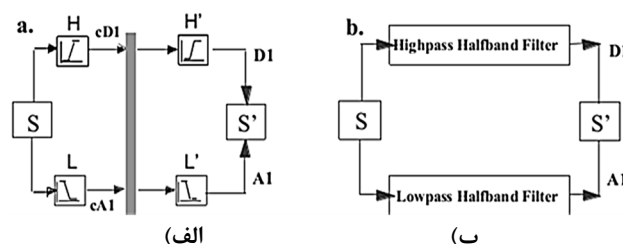
می‌شود.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

در تبدیل موجک پیوسته $b \in \mathbb{R}$ و $a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}$ یا به عبارت دیگر a متعلق به مجموعه اعداد حقیقی بدون صفر است. در این نوع تبدیل موجک تمامی مقادیر a و b در حیطه اعداد حقیقی جهت تجزیه سیگنال باید استفاده شوند. در حالی که این امر میسر نیست. در تبدیل موجک گسسته این مقادیر $\{a, b\}$ تابعی از $\{j, k\}$ هستند که هر $(j, k) \in \mathbb{Z}^2$ و $a = 2^j$ و $b = k2^j$ ، این روابط این معنا را می‌دهد که برای تبدیل موجک گسسته تنها مقادیر گسسته هستند که باید در مورد a و b مورد محاسبه قرار گیرند. در تبدیل موجک گسسته غیر کاهشی فرآیند کاهش دودویی جای خود را به صفرگذاری می‌دهد.

شکل (۱-الف) ساده‌ترین نمایش را برای تبدیل موجک غیر کاهشی ارائه می‌دهد. در ارتباط با ساختار این نوع تبدیل موجک باید گفت که از چهار فیلتر استفاده می‌کند و سمت چپ شکل مبین بخش تجزیه و سمت راست مبین بخش ترکیب یا وارون موجک است. در قسمت بالای شکل (۱-الف)، S به عنوان نتیجه فیلتر H ضرایب CD_1 را به دست می‌آورد که فیلتر H از نوع فیلتر تجزیه بالاگذر است. سپس ضرایب CD_1 وارد فیلتر H' (فیلتر بازسازی بالاگذر) می‌شود برای این که D_1 یا همان جزییات ساخته شود. این قسمت از ضرایب در واقع همان ضرایب فرکانس بالا هستند که توسط آنالیز موجک ارائه شده‌اند.

همین روند برای شاخه پایین از ضرایب CA_1 منجر به ضرایب A_1 می‌شود؛ که H و H' فیلترهای نیم باند بالاگذر L و L' فیلترهای نیم باند پایین گذر را ارائه می‌کنند.



شکل ۱: فیلتر بانک‌های تبدیل موجک غیر کاهشی تک مرحله‌ای سمت چپ بخش تجزیه و سمت راست شکل ترکیب است (Fugal, 2009).

فیلترهایی را ارائه داد که توسط گودرزی و ریاحی (۲۰۱۲) نیز پیاده شد. این فیلترها چنین عبارت‌اند از:

- عملگر Z که برای صفرگذاری طراحی شده است چنین است:

$$\forall \in \mathbb{Z}, (Z_x)_{2j} = x_j \text{ and } (Z_x)_{2j+1} = 0 \quad (3)$$

S - عملگر شیفت است و چنین تعریف می‌شود.

$$(\delta x)_j = x_{j+1} \quad (4)$$

- D_0 فاکتور کاهش باینری است:

مهم‌ترین هدف این مقاله ارائه فضای موجک جدید با محاسبات بسیار کمتر است. روش ارائه شده توسط ملائی (۱۳۹۲) در فضای موجک غیر کاهشی پیاده شده است. در این فضا طول سیگنال با طول تک تک مقیاس‌ها برابر بوده و به دلیل صفر گذاری به جای فرآیند کاهش، افزونگی تبدیل در بیشترین حد است.

تبدیل موجک مختلط با استفاده از دو تابع موجک (که هر دو جفت تقریبی هیلبرت هم هستند) تعادلی کارآمد بین ارتقای نمایش زمان-فرکانس و تعداد ضرایب در فضای موجک را ارائه می‌دهد و روش تبدیل موجک مختلط ارائه شده افزونگی میانه دارد.

سعی بر آن است نشان داده شود که فرآیند کاهش در فضای موجک مانعی برای افزایش توان تفکیک نیست و روش مطرح شده در این فضا قادر است نتایج بهتر نسبت به روش‌های مشابه با افزونگی بالاتر ارائه کند.

۲- روش مطالعه

پولاریکاس (Poularikas, 2000) تبدیل موجک از تابع $x(t)$ را چنین ارائه کرده است.

$$W_x(a, b) = \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

که علامت $*$ در این رابطه مبین وجه مختلط موجک، a مبین مقیاس و b بیانگر جابجایی موجک است. موجک در فرم عمومی معادله‌ای مشابه زیر دارد (Poularikas, 2000).

پس می‌توان تبدیل موجک گسسته را به صورت یک سری بانک فیلتر در نظر گرفت که بر سیگنال به ترتیب مشخصی اعمال می‌شوند و هر کدام به صورت جفت جفت فیلترهای آینه‌ای تربیع هم هستند (Fugal, 2009; Mundim, et al., 2006).

در تبدیل موجک گسسته غیر کاهشی این فیلترها برای تولید ضرایب هر مقیاس استفاده می‌شوند اما توجه شود که هیچ کاهشی در طول ضرایب هر مقیاس نسبت به مقیاس بعدی صورت نمی‌پذیرد. برای دستیابی به این هدف گودوین (Goodwin, 2008) عملگرها و

$$(D_0 x)_j = x_{2j} \quad (5)$$

$$\psi_{j,\ell}(t) := 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - \ell). \quad (10)$$

با استفاده از ضرب داخلی استاندارد L^2 می‌توان ضرایب مقیاس $u_{j,\ell}$ و ضرایب موجک $\omega_{j,\ell}$ را به دست آورد (Choi, et al., 2000).

$$u_{j_0,\ell} = \langle f, \phi_{j_0,\ell} \rangle \quad (11)$$

و

$$\omega_{j,\ell} = \langle f, \psi_{j,\ell} \rangle \quad (12)$$

بانک فیلتر متعامد دو کاناله شامل فیلترهای پایین گذر و بالاگذر در شکل ۲ نمایش داده شده است (Musoko and Procházka, 2004).

در پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته مرسوم با مسائلی مواجهیم که می‌توان آن‌ها را با استفاده از تبدیل موجک گسسته مختلط برطرف نمود. اول حساسیت به شیفت به نحوی که کوچک‌ترین جابجایی در نمونه منجر به تغییرات گسترده در ضرایب موجک می‌شود و دوم آن‌که جهت‌گیری در ابعاد بالاتر ضعیف است (البته به دلیل پیاده‌سازی فرم یک‌بعدی در این مقاله با آن مواجه نیستیم). علاوه بر دو عیب عمومی مذکور، محققین عیوب دیگری را برای تبدیل موجک‌های حقیقی برشمرده‌اند؛ مانند: نوسان ضرایب موجک در اطراف تکینگی‌ها که کلاً پردازش‌های بر پایه موجک را با مشکل مواجه می‌کند، دگرنامی که به دلیل نمونه‌برداری گسترده به دلیل کاهش ایجاد می‌شود (Kingsbury, 1998).

تبدیل موجک مختلط خواص و مزایایی دارد که آن را از سایر روش‌ها متمایز می‌کند. برخی از این مزایا عبارت‌اند از: تقریباً نامتغیر با زمان است. جهت یافتگی بهبود یافته نسبت به تبدیل موجک حقیقی دارد. شرط بازسازی کامل را برآورده می‌کند. افزودگی آن میانه است؛ به نحوی که محاسباتش تنها دو برابر روش تبدیل موجک مرسوم است. از دو موجک همزمان استفاده می‌کند؛ که هر دو جفت تقریبی هیلبرت هستند. تبدیل موجک گسسته مختلط (CWT) از دو شاخه از فیلترهای حقیقی استفاده می‌کند (شکل‌های ۳ و ۴).

اگر $\mathcal{H}^{[r]}$ فیلتر بالاگذر و $\mathcal{G}^{[r]}$ فیلتر پایین گذر وزن‌های $Z^r h$ و $Z^r g$ را داشته باشند، آنگاه فیلتر $\mathcal{H}^{[r]}$ وزن $h_k^{[r]} = 0$ را خواهند داشت؛ اگر k ضربی از 2^r نباشد. بنابراین $\mathcal{H}^{[r]}$ با استفاده از وارد کردن صفر مبین هر جفت المان فیلتر $\mathcal{H}^{[r-1]}$ به دست می‌آید. این رویه برای $\mathcal{G}^{[r]}$ نیز به طور مشابه پیاده می‌شود. لذا داریم:

$$D_0^r \mathcal{H}^{[r]} = \mathcal{H} D_0^r \quad (6)$$

$$D_0^r \mathcal{G}^{[r]} = \mathcal{G} D_0^r \quad (7)$$

اگر a^j یک سکانس باشد، به ازای $j = J, J-1, \dots, 1$ آنگاه $a^{j-1} = \mathcal{H}^{[J-j]} a^j$ و $b^{j-1} = \mathcal{G}^{[J-j]} a^j$. بنابراین اگر a^J طولی معادل 2^J داشته باشد، همه بردارهای a^j و b^j نیز همان طول را خواهند داشت. پس از لحاظ محاسباتی برای یافتن $b^{J-1}, b^{J-2}, \dots$ و b^0 و a^0 نیاز به $J2^J$ عمل اصلی است. در صورتی که برای روش با فاکتور کاهش، تنها نیاز به 2^J محاسبه و عمل اصلی است. مضاف بر این، مجموع ضرایب در حیطه تبدیل موجک غیر کاهش به همین دلیل بیشتر و عملگرهای ثانویه که بر ضرایب در این فضا اعمال می‌شوند؛ به همین تعداد نیازمند عملیات بیشتر هستند.

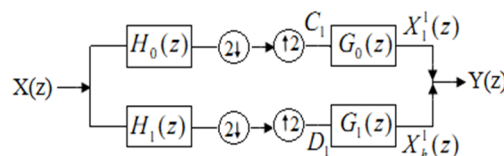
۲-۱- روش تبدیل موجک گسسته مختلط

به صورت عمده روش‌های زمان فرکانس برای سری‌های زمانی گذرا مورد استفاده قرار می‌گیرند (Wang, et al., 2011). تبدیل موجک یک‌بعدی با استفاده از جابجایی‌ها و کشیدگی‌های موجک مادر $\psi(t)$ و تابع مقیاس $\phi(t)$ چنین تعریف می‌شود (Choi, et. al, 2000):

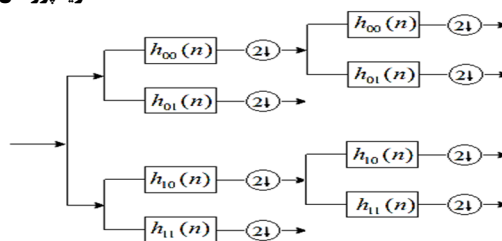
$$f(t) = \sum_{\ell \in \mathbb{Z}} u_{j_0,\ell} \phi_{j_0,\ell}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_{\ell \in \mathbb{Z}} \omega_{j,\ell} \psi_{j,\ell}(t) \quad (8)$$

که

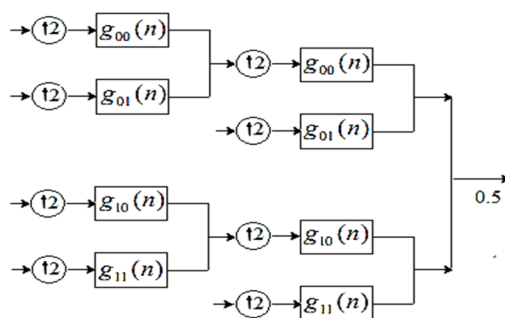
$$\phi_{j_0,\ell}(t) := 2^{\frac{j_0}{2}} \phi(2^{j_0} t - \ell) \quad (9)$$



شکل ۲: دیگرام شماتیک تجزیه و بازسازی تبدیل موجک گسسته مرسوم (Musoko and Procházka, 2004).



شکل ۳: فیلتر بانک‌های تجزیه دو شاخه روش CWT (Kingsbury, 2001).



شکل ۴: فیلتر بانک‌های ترکیب دو شاخه روش CWT (Kingsbury, 2001).

که منجر به ارائه فیلتر IIR می‌شود؛ اما در عمل ناگزیریم که به تعدادی محدود از ضرایب اکتفا کنیم. دلیل این‌که این تبدیل تقریباً نامتغیر با زمان است و همانند فوریه دقیق نیست نیز همین مسئله است. البته سلسنیک (Selesnick, 2001) نشان داد که برای ساده‌سازی محاسباتی کافی است که فیلترهای مدنظر تنها نیم نمونه تأخیر داشته باشند.

$$h_{01}(n) \approx h_{00}(n - 0.5) \Rightarrow \psi_{h_1}(t) \approx H\{\psi_{h_0}(t)\} \quad (14)$$

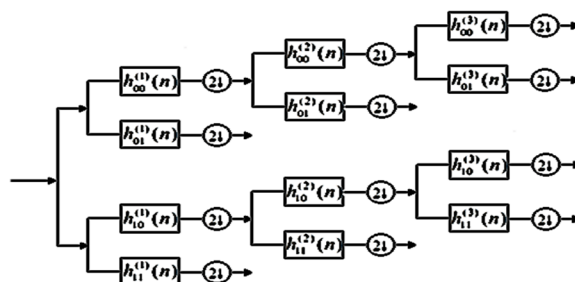
برای این منظور که روش دو شاخه ارائه شود؛ اگر $h_{00}(n)$ فیلتر موجک باشد آنگاه فیلتر $h_{01}(n)$ باید شرط زیر را ارضا نماید (شکل ۵).

$$H_{01}(e^{j\omega}) \approx e^{-j0.5\omega} H_{00}(e^{j\omega}) \quad (15)$$

$h_1(n)$ و $h_0(n)$ قسمت حقیقی و موهومی ضرایب مختلط را تولید می‌نمایند. $h_{11}(n)$ و $h_{00}(n)$ فیلترهای پایین/بالا گذر شاخه بانک فیلتر بالایی هستند که جفت هیلبرت آن‌ها در شاخه پایینی استفاده می‌شود. موجک‌های حقیقی $\psi_{h_0}(t)$ و $\psi_{h_1}(t)$ هستند. سلسنیک و همکارانش (Selesnick et al., 2005) نشان دادند که این دو موجک باید جفت هیلبرت تقریبی باشند به نحوی که

$$\psi_c(t) = \psi_{h_0}(t) + j\psi_{h_1}(t) \quad (13)$$

کرنل‌های فوریه سینوس و کسینوس هستند که هر دو جفت دقیق هیلبرت هم هستند؛ از طرفی تبدیل موجک گسسته نیاز به کرنل با طول محدود، برای ارائه بیشترین محلی سازی دارد. برای به دست آوردن جفت دقیق هیلبرت تعداد ضرایب باید نامحدود باشد؛



شکل ۵: فیلتر بانک‌های چند مرحله‌ای تجزیه روش CWT با فیلترهای متفاوت در هر مرحله (Selesnick, et.al, 2005).

۲-۲- تبدیل هیلبرت و محاسبه پوش هیلبرت

تبدیل هیلبرت عامل ایجاد ۹۰ درجه تغییر فاز بدون تغییر دامنه سیگنال است. ارتباط بین ورودی و خروجی در تبدیل هیلبرت چنین است:

$$\begin{cases} F_1(w) = H(jw).F(w) \\ F_1(w) = -jF(w) \text{ for } w \geq 0, \\ F_1(w) = jF(w) \text{ for } w < 0, \end{cases} \quad (16)$$

می‌توان بین ورودی و خروجی رابطه‌ای ایجاد کرد؛ که منجر به سیگنال تحلیلی شود؛ که عبارت است از:

$$g(r) = f(r) + jf_1(r), r = x + jz \quad (17)$$

اگر $g(t)$ ضرایب موجک در هر تک مقیاس باشد، با در نظر گرفتن $\omega > \Omega$ پوش را می‌توان با استفاده از مقدار مطلق سیگنال تحلیلی $N(g(t))$ به دست آورد. این سیگنال تحلیلی از $g(t)$ و تبدیل هیلبرت آن یعنی $\tilde{g}(t)$ تشکیل شده است.

$$N(g(t)) = g(t) + i\tilde{g}(t) \quad (18)$$

با شکل‌دهی تبدیل هیلبرت تابع $g(t)$ داریم:

$$\tilde{g}(t) = - \int_0^{\infty} [a(f) \sin(ft) - b(f) \cos(ft)] df \quad (19)$$

$$\begin{aligned} a(f) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cos(ft) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} [\delta(f - \omega + \Omega) - \delta(f - \omega - \Omega)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} b(f) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \sin(ft) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sin(\omega t) \sin(\Omega t) \sin(ft) dt = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

اکنون با به دست آوردن $a(f)$ و $b(f)$ و جای‌گذاری در روابط ۱۸ و ۱۹ خواهیم داشت:

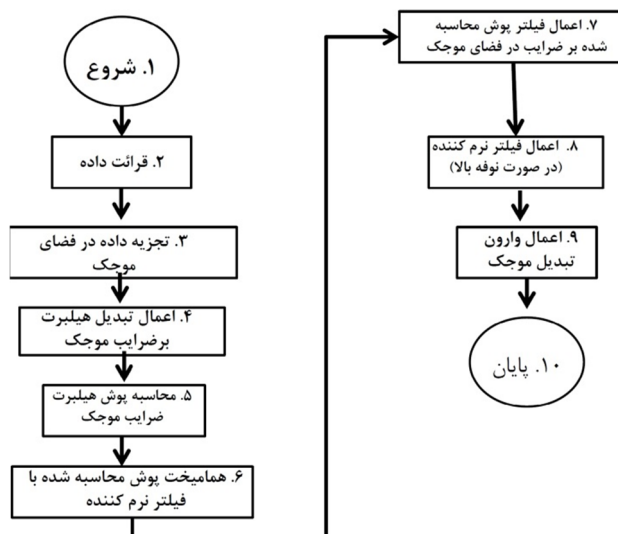
$$\tilde{g}(t) = \frac{1}{\pi} \sin(\Omega t) \cos(\omega t) \quad (22)$$

$$|N| = \sqrt{NN^*} = |\sin(\Omega t)| \quad (23)$$

پس از تخمین پوش، ضرایب نرمالیزه شده اعمال می‌گردند.

۳- اعمال روش بر روی داده مصنوعی

برای پیاده‌سازی روش‌های مطرح شده داده مصنوعی با استفاده از موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۰ هرتز تولید شد. بازه نمونه‌برداری مدنظر ۴ میلی‌ثانیه و فاصله ردلرزه‌ها از یکدیگر ۵ متر در نظر گرفته شد (شکل ۷). روش کار این چنین است که ابتدا ردلرزه توسط تبدیل‌های موجک گسسته مطرح شده به سطوح مختلفی تجزیه می‌شود. سپس با محاسبه پوش هیلبرت در تک تک مقیاس‌ها ضرایب بهره می‌یابند و درنهایت با بازگردانی از حیطه موجک داده که با افزایش دامنه سیگنال‌های فرکانس بالا مواجه شده است؛ توان تفکیک بالاتری را ارائه می‌دهد. در صورتی که سطح نوفه اتفاقی بالا باشد، از یک فیلتر نرم‌کننده که در اینجا فیلتر آستانه گذار نرم است، استفاده می‌شود (در این تحقیق نسبت سیگنال به نوفه کمتر از ۶ دسی‌بل، سطح نوفه بالا تلقی شده است). شکل ۶ فلوچارت روش مطرح شده را ارائه می‌کند.



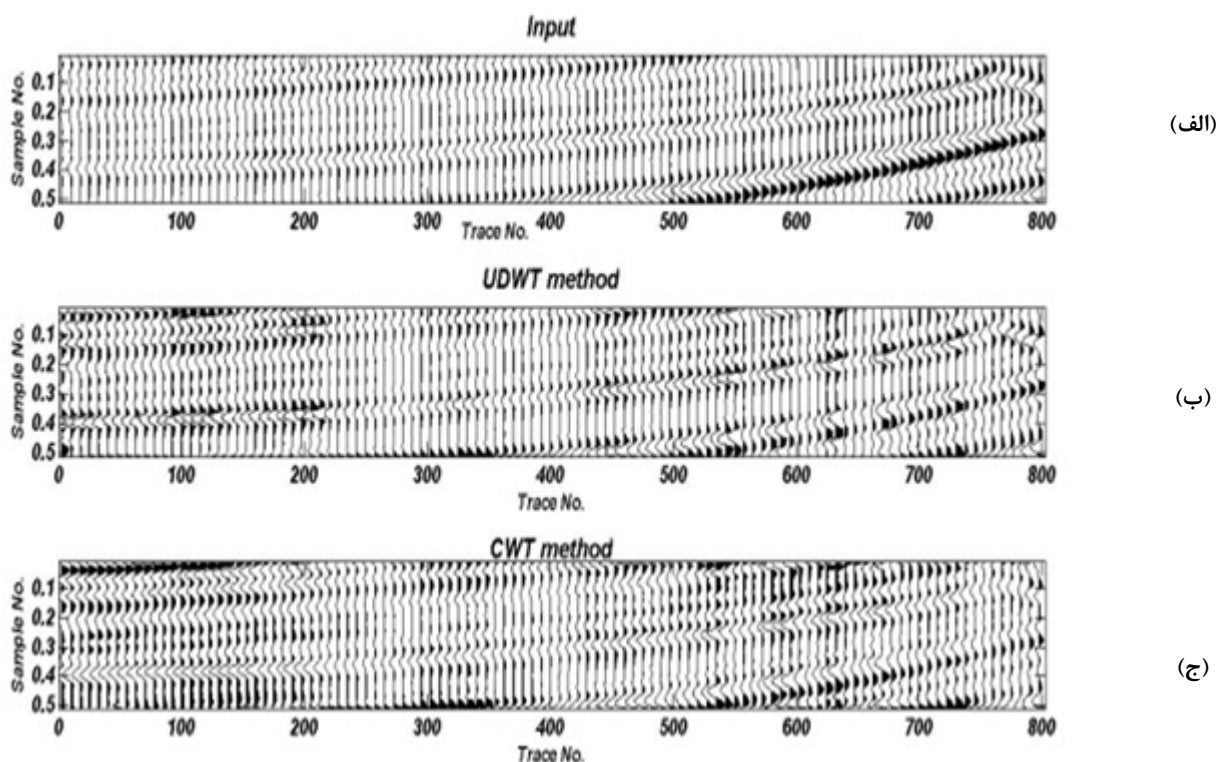
شکل ۶: فلوچارت الگوریتم ارائه شده در این مطالعه.

فشرده‌سازی قابل توجه روش CWT-HT را ارائه می‌دهد. برای بررسی اثر نوفه بخشی از شکل ۷-الف انتخاب و به میزان سیگنال به نوفه ۲ دسی‌بل، نوفه اتفاقی به آن افزوده شد (شکل ۷-د). شکل‌های ۷-د تا ۷-ز برتری محسوس روش ارائه شده در فضای CWT نسبت به فضای UDWT را در حضور نوفه نشان می‌دهد.

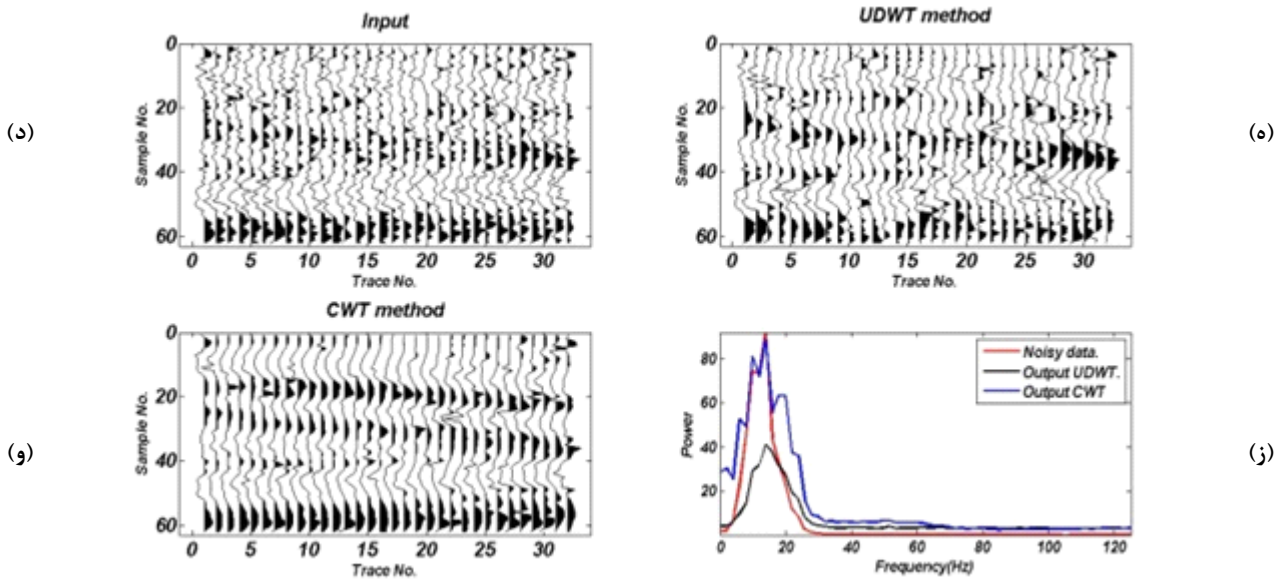
به صورت مرسوم محققین جهت ارائه روش‌های ارتقای توان تفکیک مدل گوه را جهت مرتفع کردن پدیده تداخل (اثر تیونینگ) ارائه می‌نمایند. مقطع شکل ۸ نتیجه اعمال روش‌های ارائه شده بر مدل گوه است. شکل ۸-الف داده ورودی، شکل ۸-ب خروجی روش در فضای UDWT و شکل ۸-ج خروجی روش در فضای CWT است همان‌طور که مشخص است پهن ۸-ج ارتقا و جدایش خوبی از تفکیک دولایه نزدیک به هم ارائه نموده است. طیف توان ۸-د نیز می‌تواند به درک سازوکار انجام گرفته کمک نماید.

توجه شود که بخش‌های فرکانس بالای سیگنال و فرکانس پایین آن در مقیاس‌های مجزا قرار می‌گیرد و همین امر باعث می‌شود که محاسبه پوش در تک تک مقیاس‌ها یکسان نبوده؛ اما درنهایت با بهره تمامی ضرایب در تمامی مقیاس‌ها با ۱ نرمالایز شده و مقیاس‌ها تقریباً هم‌تراز می‌شوند.

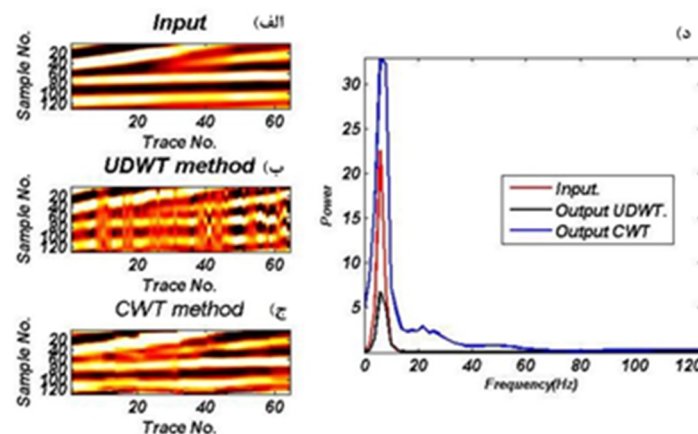
هویداست که به دلیل تداخل در شکل ۷-الف بسیاری از رویدادها محو شده‌اند؛ زیرا تداخل به سیگنال آسیب وارد کرده است. شکل ۷-ب خروجی روش UDWT است. اگرچه در مقایسه با داده ورودی توان تفکیک افزایش یافته؛ اما دقت کار در مقایسه با مقطع ۷-ج چشم‌گیر نیست؛ که به دلیل ضعف‌های تبدیل UDWT است. در شکل ۷-ج روش ارائه شده CWT بر داده مصنوعی پیاده شده و توان تفکیک افزایش یافته؛ که مبین بازیابی لایه‌های متعدد است؛ که در شکل ۷-الف قابل پیگیری نیست. از طرفی به دلیل تعداد ضرایب کمتر در حیطه موجک، روش CWT نسبت به روش UDWT محاسبات کمتری دارد و نتیجه داده مصنوعی برتری محاسباتی و



شکل ۷: الف) داده مصنوعی ورودی، ب) خروجی فضای UDWT، ج) خروجی فضای CWT، د) بخشی از داده مصنوعی نوفه دار با نسبت سیگنال به نوفه ۲ دسی‌بل، ه) خروجی فضای UDWT، و) خروجی فضای CWT، ز) طیف توان داده مصنوعی ورودی (قرمز) خروجی فضای UDWT (سیاه) خروجی فضای CWT (آبی).



شکل ۷: ادامه.



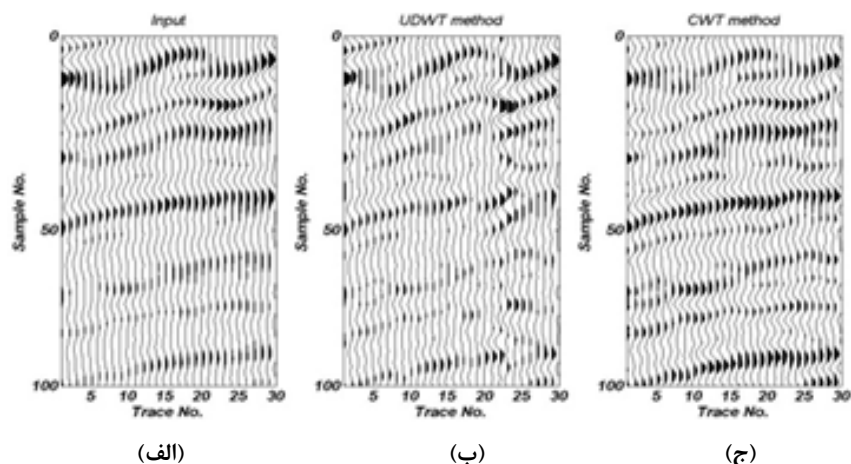
شکل ۸: (الف) داده مصنوعی گوه، (ب) خروجی فضای UDWT، (ج) خروجی فضای CWT، (د) طیف توان داده مصنوعی ورودی (قرمز) خروجی فضای UDWT (سیاه) خروجی فضای CWT (آبی).

نتایج مشابه داده اول برای داده دوم به دست آمده که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتیجه روش در فضای UDWT قابل قبول نبوده؛ اما فضای CWT توانسته است در بازیابی رویدادها کمک شایانی ارائه دهد. شکل (۱۱-د) طیف توان مقطع (۱۱-الف تا ج) را ارائه می‌دهد.

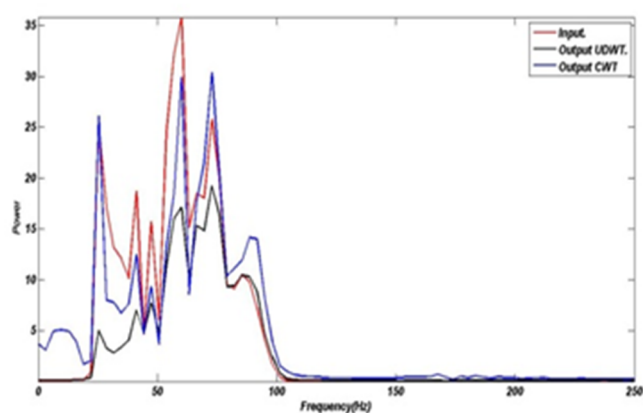
شکل ۱۲ داده‌های واقعی سوم را نشان می‌دهد؛ که روش مدنظر بر داده‌های برداشت نقطه میانی مشترک اعمال شده و سپس کلیه مراحل پردازشی تا برانبارش بر آن پیاده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲-ب در مقایسه مشخص است، پیوستگی لایه‌ها افزایش یافته است (اعمال روش بر این داده فقط در فضای CWT صورت پذیرفته است).

۳-۱- اعمال روش بر روی داده‌های واقعی

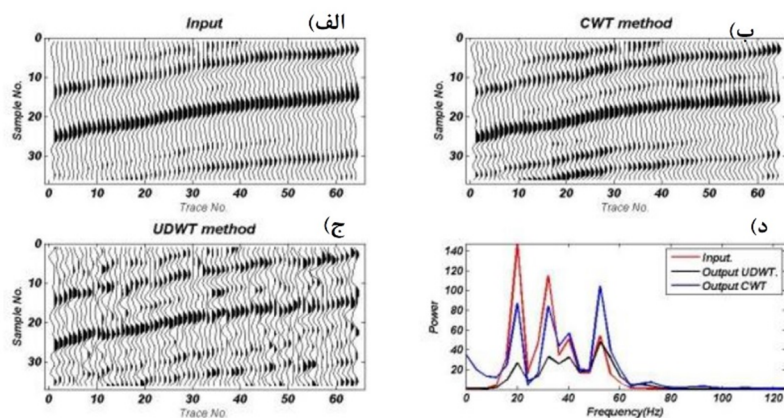
برای بررسی کارایی روش مطرح شده بر روی داده‌های واقعی، ۳ دسته داده مدنظر قرار گرفت. داده‌های اول و دوم داده‌های پس از برانبارش و داده‌های سوم داده پیش از برانبارش است؛ که با انجام مراحل پردازشی تا برانبارش نتیجه روش ارائه شده را بیان می‌کنند. شکل ۹ داده ورودی و خروجی واقعی اول را نشان می‌دهد. شکل ۹-الف داده ورودی را نشان می‌دهد. روش UDWT (شکل ۹-ب) همان‌طور که مشخص است نتوانسته است ارتقای قابل قبولی را ارائه دهد؛ اما روش در فضای CWT (شکل ۹-ج) به خوبی توانسته است رویدادها را ارتقا بخشد و پیوستگی آن را افزایش دهد. طیف توان (شکل ۱۰) مبین برتری اعمال روش در فضای CWT است.



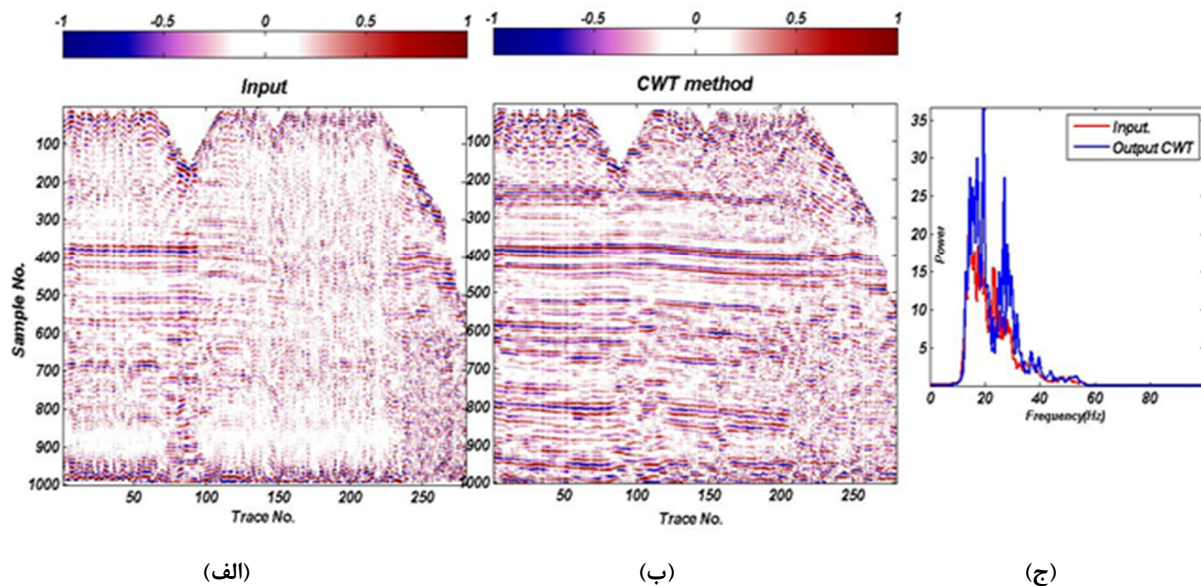
شکل ۹: (الف) داده واقعی اول (ب) خروجی فضای UDWT (ج) خروجی فضای CWT.



شکل ۱۰: طیف توان داده واقعی اول (قرمز) خروجی فضای UDWT (سیاه) خروجی فضای CWT (آبی).



شکل ۱۱: (الف) داده‌های واقعی دوم (ب) خروجی فضای CWT (ج) خروجی فضای UDWT (د) طیف توان داده ورودی (قرمز) خروجی فضای UDWT (سیاه) خروجی فضای CWT (آبی).



شکل ۱۲: (الف) مقطع برانبارش شده بدون اعمال روش پیشنهادی، (ب) مقطع برانبارش شده پس از اعمال روش در فضای CWT، (ج) طیف توان ورودی و خروجی.

۴- نتیجه‌گیری

افزایش توان تفکیک داده‌های لرزه‌ای بازتابی یکی از اهداف مهم در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای است؛ که توانایی تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی را به نحوی محسوس افزایش می‌دهد. روش ارائه شده در این مقاله مبتنی بر داده است؛ که بدون هیچ تقریب یا تخمین با ارتقای فرکانس‌های موجود با استفاده از تبدیل هیلبرت در فضای موجک می‌تواند نتایج قابل‌قبولی را ارائه دهد. نتایج بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی پیاده شده و تأیید کننده کارآمدی روش پیشنهادی در فضای تبدیل موجک گسسته مختلط است. فضای CWT نسبت به UDWT ارتقای زمان-فرکانس بالاتری داشته و نتایج حاکی از برتری این فضا نسبت به UDWT است. از این رو با توجه به محاسبات کمتر و اثرات جانبی جزئی این فضا به عنوان حیطه مناسب برای ارتقای توان تفکیک معرفی می‌گردد. علاوه بر کاربردهای تفسیری که در داده‌های واقعی اول و دوم ارائه گردید، به دلیل کارآمدی و سرعت بالای روش مطرح شده، این روش بر داده پیش از برانبارش نیز پیاده شد؛ که اثرات قابل توجه بهبود را در مقطع برانبارش ارائه کرده است.

۵- منابع

علایی، ن.، روشندل کاهو، ا. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۵، بهبود قدرت تفکیک قائم لرزه‌ای با استفاده از خاصیت مقیاس کردن زمانی تبدیل فوریه، پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۲ (۱)، ۵۷-۶۶.

توجه شود که داده‌های واقعی سوم مبین آن است که اعمال روش بر داده پیش از برانبارش می‌تواند منجر به حصول نتیجه دقیق‌تر شده و فشردگی و بازیابی رویدادها حتی پیش از برانبارش ضروری است. از طرفی این امر به دلیل حجم بالای محاسبات با روش UDWT میسر نیست و با استفاده از روش CWT الگوریتم ارائه شده قابلیت پیاده‌سازی بر روی داده‌های با حجم بالا را ارائه داد.

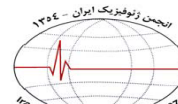
تبدیل موجک گسسته مختلط (CWT) بر اساس دستیابی به ضرایب مختلط توسط فیلترهای موجک دوشاخه بنا شده است؛ که همزمان می‌تواند بخش حقیقی و موهومی سیگنال را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. البته به دلیل وجود دو موجک که نیم نمونه تأخیر دارند، نمونه‌برداری آن چگال تر بوده و دقیقاً دو برابر تبدیل موجک گسسته تک شاخه تک فیلتر از سیگنال در هر مقیاس نمونه برمی‌دارد؛ که اثرات دگرگونی را تا حد بسیار زیادی کاهش می‌دهد (Selesnick et al., 2005). در واقع عدم وجود نوفه‌های ذاتی برخلاف روش در فضای UDWT نیز همین ارتقای زمان-فرکانس ناشی از نمونه‌برداری و آنالیز مختلط موجک است. CWT هزینه محاسباتی کمتری دارد که برای صنایع اکتشافی بسیار با اهمیت است.

نتایج داده‌های واقعی و مصنوعی مبین کارآمدی روش مطرح شده در فضای CWT است؛ به نحوی که اعمال این روش بر داده‌های پیش از برانبارش و فشردگی ایجاد شده در زمان و به طبع آن ارتقای طیف فرکانسی داده می‌تواند منجر به افزایش دقت آنالیز سرعتی و در نهایت ارائه برانبارش کارآمدتری شود.

- Pinar, R., 1985, Karmaşık gradient yönteminin düşey sureksizliklere uygulanması ve bilgisayarlarla gerçekleştirimi, E. Ü. Bilgisayar Arastırma ve Uygulama Merkezi Dergisi, Cilt: 8, Sayı: 1. (In Turkish with English Abstract).
- Poularikas, A.D., 2000, The transform and application Handbook, Second Edition, CRC Press.
- Rao, A.D., Babu, R.H.V. and Sivakumar, S.G.D., 1982, A Fourier Transform method for the interpretation of self-potential anomalies due to a two-dimensional inclined sheet of finite depth extent, Pure and Applied Geophysics, 120, 365-374.
- Rawat, A. and Surinder S.D., 2010, Resolution enhancement of seismic data using stationary wavelet transform, Bienninal international conference & Exposition petroleum geophysics inverse DWT.
- Roshandel Kahoo, A. and Gholtashi, S., 2015, An Improvement in Temporal Resolution of Seismic Data Using Logarithmic Time-frequency Transform Method, Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, 4 (2), 27-39.
- Rusu, C., Kuosmanen, P. and Astola, J.T., 2011, Hilbert transform of discrete data a brief review, Proc. Int. TICSP Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, pp. 79-84
- Selesnick, I.W., 2001, The double density DWT, In A. Petrosian and F. G. Meyer, editors, Wavelets in Signal and Image Analysis, From Theory to Practice. Kluwer.
- Selesnick, I.W., Baraniuk, R.G. and Kingsbury, N.G., 2005, The dual-tree complex wavelet transform- a coherent framework for multiscale signal and image processing, IEEE Signal Process, 22, 123-151.
- Wang, Y., Wu, W., Zhu, Q. and Shen, G., 2011, Discrete Wavelet Transforms - Theory and Applications, Edited by Juuso T. Olkkonen, ISBN 978-953-307-185-5, Hardcover, 256 pages, Publisher: InTech, Published: April 04, 2011 under CC BY-NC-SA 3.0 license DOI: 10.5772/649.
- Yilmaz, O., 2001, Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, SEG,
- Zhang, G.L., Wang, X.M., He, Z.H., Zhang, J.J., Liu, H.J., Zhang, Y.B. and Wang, Y.H., 2015, The Study of Inverse Q-filter for Seismic Resolution Enhancement, 3rd EAGE Workshop on Borehole Geophysics, pp. 1-4, DOI: 10.3997/2214-4609.201412194.
- Zhou, Y., Dellinger, J., Gutowski, P. and Garossino, P., 2004, Seismic resolution enhancement in the wavelet transform domain, AIT, BP America, SEG Int Exposition and 74th annual meeting, Denver, Colorado.
- ملائی، ف.، ۱۳۹۲، ارتقاء قدرت تفکیک داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تبدیل موجک گسسته، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Akgun, M., 2000, Estimation of some bodies parameters from the self-potential method using Hilbert transform, Journal of the Balkan Geophysical Society, 4 (2), 29-44.
- Anderson, B.D.O. and Green, M., 1988, Hilbert transform and gain/phase error bounds for rational functions, IEEE Transactions on Circuits and Systems, 35 (5), 528.535.
- Choi, H., Romberg, J., Baraniuk, R. and Kingsbury, N., 2000, Hidden Markov tree modelling of complex wavelet transform, ICASSP'00, 1, 133-136.
- Ferner, R., Naghizadeh, M. and Sacchi, M.D., 2012, Frequency enhancement of data via tunable Q-factor wavelet transform, GeoConvention 2012.
- Fugal, D.L., 2009, Conceptual Wavelets in digital signal processing, Space & Signal Technologies LLC.
- Goodwin, D.A., 2008, Wavelet analysis of temporal data, Ph.D. Thesis, The University of Leeds.
- Goudarzi, A. and Riahi, M., 2012, Seismic coherent and random noise attenuation using the undecimated discrete wavelet transform method with WDGA technique, Journal of Geophysics and Engineering, 9, 619-63.
- Goudarzi, A., Riahi, M. and Rabiei, M., 2014, Ground roll attenuation using real and complex DWT based methods, Digital Signal Processing Journal, 32, 67-78
- Hafez, M.A., 2009, A new approach to interpret self-potential anomaly over a two-dimensional inclined sheet using complex gradient analysis, Journal of Geophysics and Engineering, 2, 97-102.
- Kingsbury, N.G., 1998, The dual-tree complex wavelet transform, a new technique for shift invariance and directional filters, In Proceedings of the Eighth IEEE DSP Workshop, Utah, August 9-12.
- Kingsbury, N.G., 2001, Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals, Applied and Computational Harmonic Analysis, 10, 234-253.
- Mundim, E.C., Schots, H.A. and Araujo, J.M., 2006, WTdecon, a colored deconvolution implemented by wavelet transform, The Leading Edge, April, pp. 398-401.
- Musoko, V. and Procházka, A., 2004, Complex wavelet transform in signal and image analysis, 14th International Scientific-Technical Conference on Process Control 2004, Koutynad Desnou, Czech Republic.



Shahrood University of Technology



Seismic resolution enhancement using complex wavelet transform

Alireza Goudarzi^{1*} and Farhad Mollaei²

1- Assistant Professor, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- M.Sc., Oil Engineering Group, Islamic Azad University, Lamerd Branch, Fars, Iran

Received: 11 April 2017; Accepted: 21 July 2017

* Corresponding author: a.goudarzi@kgut.ac.ir

Keywords

DWT

Resolution

Seismic Data

Hilbert Transform

Extended Abstract

Summary

The resolution of seismic data decreases due to tuning effect, attenuation, and absorption and has always been one of the challenges for the interpreters. We can perform resolution enhancement in many ways, and in this regard, spiking deconvolution is the most critical approach. The ideal method to increase the resolution is to magnify or retrieve weak high frequency signals to provide a

broad frequency spectrum, and therefore, substantially compressed signals. In this paper, a Hilbert-wavelet derived method has been investigated for this purpose. First, the input data using the wavelet transform (WT) are decomposed and enhanced by the Hilbert transform (HT) in the wavelet domain. The inverse WT yields compressed data based on current frequencies without any estimate and approximations. The Lack of significant distortions of recovered frequencies makes this process more distinctive than introduced methods. In this study, complex wavelet transform (CWT) and undecimated discrete wavelet transform (UDWT) are used. In fact, UDWT provides increased resolution, but on the opposite side, CWT presents impressive results. It delivers fewer artifacts because of its time-frequency representations due to its unique combination of shift-invariant. This approach has been proposed and implemented to shot gathers after preliminary processing.

Introduction

We can characterize a seismic trace as a convolution of two unknown discrete time series: a source wavelet and reflectivity series. The reflectivity series can constitute the unknown geology. The objective of geophysical data processing is to get information of data to prepare interpretable results (Yilmaz, 2001). Researchers have stated various methods to enhance the resolution and frequency bandwidth, such as inversion-based and spectral methods. An additional approach for improving the resolution is deconvolution. Nevertheless, the efficiency of this method relies on many considerations, including noise and source type. Therefore, we cannot obtain the desired results perfectly (without any damage to the signal) (Yilmaz, 2001). Fourier-based methods cannot deal with non-stationary signals and suffer from side effects such as the frequency leakage. One method that has recently been implemented to geophysical data, is discrete WT to consider unstable properties of seismic data. The enhancement of the seismic bandwidth has been achieved based on several types of WTs (Rusu et al., 2011; Zhou, 2004; Rawat & Surinder, 2010; Ferner et al., 2012).

Methodology and Approaches

The CWT has been presented by Kingsbury (2001) and implemented by Goudarzi et al. (2014) for seismic noise attenuation. The wavelet in comparison with the Fourier analysis can handle wide ranges of signals. A deficiency of the DWT refers to signal representation at the discrete number of decomposition levels. Each level has twice the frequency content than the previous level. Pinar (1985) and Rao et al. (1982) determined fault parameters by applying the HT on gravity and magnetic data. In this paper, a Hilbert-wavelet derived method for this purpose has been examined. First, the input data using the wavelet transform (WT) are decomposed and enhanced by the HT in the wavelet domain. The inverse WT yields compressed data based on the current frequencies without any estimate and approximations.

Results and Conclusions

Seismic resolution enhancement is an essential step in geophysical data processing. It is implemented for the thin layer identification as a necessity for hydrocarbon exploration. A data-oriented approach has been proposed for improving the seismic resolution using DWT and HT. We have used this method on synthetic data and three real sections. The

results have shown that UDWT and CWT improve the seismic data resolution. However, CWT results are better than UDWT results for this purpose. The advantage of CWT method compared to UDWT is prominent. CWT produces fewer artifacts compared to UDWT due to the process because the CWT is less sensitive to abrupt changes than other similar WTs. CWT has considerably lower computational cost than UDWT due to less redundancy that is important for the seismic exploration industry. The results of the real and synthetic examples illustrate that the proposed method is beneficial for resolution enhancement of post-stack seismic data. We suggest that the method could be applied to shotgather after further filtering. This approach compresses the signal, and consequently, precise velocity analysis yields to a more accurate stacked section.
