

کاربرد تجزیه مد تجربی و طیف فرکانس لحظه‌ای برای تضعیف نوفه و تشخیص سایه فرکانس پایین در داده‌های لرزه‌ای

محمدصادق پرکان^{۱*}، حمیدرضا سیاه‌کوهی^۲ و علی غلامی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

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

(دریافت: ۹۳/۶/۳۱، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش تجزیه مد تجربی، طیف فرکانس لحظه‌ای یا طیف هیلبرت معرفی و به منظور حذف امواج زمین‌غلت، حذف نوفه تصادفی و تجزیه طیفی مقاطع لرزه‌ای به کار گرفته شده است. طیف هیلبرت پیشنهادی کاستی‌های فرکانس لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت مرسوم را ندارد. برتری نتایج استفاده از طیف هیلبرت در پردازش و تفسیر با اعمال روش روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی نشان داده شده است. همچنین در زمینه تجزیه طیفی مقاطع لرزه‌ای برای اولین بار از مقاطع فرکانس لحظه‌ای ثابت برای تشخیص نواحی کم‌فرکانس مقطع لرزه‌ای استفاده شده است که نتایج نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مقاطع فرکانس لحظه‌ای ثابت در امر تجزیه طیفی داده لرزه‌ای است.

واژه‌های کلیدی: تجزیه مد تجربی، سایه کم‌فرکانس، طیف هیلبرت، فرکانس لحظه‌ای، موج زمین‌غلت، نوفه تصادفی

۱. مقدمه

تجزیه مد تجربی (CEEMD) آن را به بخش‌هایی با عنوان مد ذاتی تقسیم‌بندی می‌کند که هر یک در بردارنده قسمت‌های هم‌مقیاس از داده هستند؛ به این صورت که در مد اول کوچک‌ترین مقیاس‌های داده و در مدهای بعدی به تدریج مقیاس‌های بزرگ‌تر قرار می‌گیرند. با بهره‌گیری از این خصوصیت تجزیه مد تجربی، الگوریتم‌های مختلفی برای پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای معرفی شده است که به عنوان مثال می‌توان به موارد روش‌دندل، کاهو و نجاتی کلاته (۱۳۸۹)، بسیم (۲۰۱۱) و فریرا و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد.

مفهوم دیگری که در این مقاله به آن اشاره می‌شود، فرکانس لحظه‌ای است. تعریف فرکانس لحظه‌ای برای یک تابع تک‌مؤلفه‌ای (یک تابع سینوسی یا کسینوسی) به خوبی شناخته شده است و عبارت است از تغییرات فاز نسبت به زمان. به همین دلیل از دیرباز از فرکانس لحظه‌ای برای تجزیه و تحلیل داده‌های تک‌مؤلفه‌ای استفاده شده است. بعد از معرفی تبدیل هیلبرت در سال ۱۹۰۵ میلادی محاسبه فرکانس لحظه‌ای از داده‌های غیر تک‌مؤلفه‌ای از

تجزیه مد تجربی (Empirical mode decomposition, EMD) یک روش تجزیه طیفی داده است که اولین بار توسط هوانگ و همکاران در سال ۱۹۹۸ معرفی شد. این روش از زمان معرفی چند مرحله تکامل را طی کرده است. بعد از معرفی روش اولیه، وو و هوانگ در سال ۲۰۰۹ به دلیل وجود مشکل ترکیب مد، روش تجزیه مد تجربی دسته‌ای (Ensemble empirical mode decomposition, EEMD) را معرفی کرده و سپس تورس و همکاران در سال ۲۰۱۱ با معرفی تجزیه مد تجربی دسته‌ای کامل (Complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD) مشکل غیرکامل بودن روش‌های پیشین را برطرف کردند. هرکدام از این روش‌ها دارای خصوصیتی است که آن‌ها را برای تجزیه داده‌های مختلف مناسب می‌کند. در این نوشته در عملیات پردازشی از تجزیه مد تجربی دسته‌ای کامل استفاده شده که از این پس با نام اختصاری CEEMD از آن یاد می‌کنیم. تجزیه داده به کمک هر یک از روش‌های تجزیه مد تجربی (EMD, EEMD, CEEMD)

کاربردهای فرکانس لحظه‌ای و طیف هیلبرت به‌عنوان تجزیه‌ی زمان-فرکانس در بخش‌های مختلف لرزه‌شناسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله کاربردهای فرکانس لحظه‌ای حاصل از روش CEEMD در حذف امواج زمین‌غلت و حذف نوفه تصادفی از داده‌های لرزه‌ای، بررسی و نتایج حاصل روی داده‌های طبیعی و مصنوعی ارائه شده‌اند. همچنین تحقیقی برای تشخیص نواحی فرکانس پایین مقطع لرزه‌ای با استفاده از مقاطع فرکانس ثابت لحظه‌ای صورت گرفته است که نتایج آن نشان‌دهنده کارابودن این روش است.

۲. تئوری روش‌های EMD, EEMD, CEEMD

۲.۱. روش EMD

همان‌طور که گفته شد هر کدام از روش‌های تجزیه مد تجربی، داده را به بخش‌هایی با عنوان مد ذاتی تجزیه می‌کنند که فرکانس لحظه‌ای مثبت از آن‌ها قابل محاسبه است؛ بنابراین دانستن تعریف مد ذاتی به درک چگونگی کارکرد الگوریتم هریک از روش‌های تجزیه مد تجربی کمک زیادی می‌کند. بنابراین مد ذاتی تابعی است که دو شرط اساسی زیر را برآورده کند:

۱. تعداد نقاط بیشینه و کمینه باید برابر باشند یا حداکثر یکی اختلاف داشته باشند.

۲. در هر نقطه میانگین پوش بالایی (که از برازش یک منحنی اسپلاین به نقاط بیشینه تابع به دست می‌آید) و پوش پایینی (که از برازش یک منحنی اسپلاین به نقاط کمینه تابع به دست می‌آید) برابر با صفر باشد.

با این تعریف الگوریتم روش EMD که تابع را به مدهای ذاتی تجزیه می‌کند، در زیر توضیح داده شده است:

اگر داده‌ای مانند $X(t)$ داشته باشیم ابتدا نقاط اکسترمم داده شناسایی می‌شوند. سپس یک خط اسپلاین به نقاط بیشینه برازش داده می‌شود و به این ترتیب پوش بالایی داده به دست می‌آید. این مراحل برای نقاط کمینه تکرار می‌شود و پوش پایین داده نیز به دست می‌آید. تمام نقاط داده باید بین پوش بالا و پوش پایین قرار بگیرند. سپس

طریق سیگنال تحلیلی امکان‌پذیر شد. اما به دلیل اینکه استفاده از تبدیل هیلبرت و سیگنال تحلیلی به تولید فرکانس‌های منفی در برخی موارد منجر می‌شود و این فرکانس‌ها از نظر فیزیکی بی‌معناست، نوشته‌های ضد و نقیضی از بی‌معنابودن فرکانس لحظه‌ای تا معرفی آن به عنوان ضرورتی برای تحلیل داده‌های با فرکانس متغیر با زمان منتشر شده است (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸). استفاده از فرکانس لحظه‌ای حاصل از تبدیل هیلبرت در بخش‌های مختلف تفسیر داده‌های لرزه‌ای به‌عنوان نشانگر بسیار رایج است و در این خصوص می‌توان به استفاده از آن به‌عنوان نشانگر ضخامت لایه و پارامترهای سنگ‌شناسی، پیدا کردن فرکانس میانگین موجک لرزه‌ای، نشانگر مرزهای لایه‌های امپدانس پایین نازک، نشانگر هیدروکربن با آنومالی فرکانس پایین، نشانگر ناحیه شکستگی، نشانگر ناحیه بازتاب‌های آشفته و نشانگر نسبت ماسه به شیل، اشاره کرد (سابراه مانیام و رائو، ۲۰۰۸).

ترکیب تبدیل هیلبرت و فرکانس لحظه‌ای با روش تجزیه مد تجربی به نوعی تبدیل زمان-فرکانس می‌انجامد. به دلیل اینکه مدهای ذاتی حاصل از تجزیه مد تجربی دارای ویژگی‌هایی هستند که فرکانس لحظه‌ای مثبت و صحیح از آن‌ها قابل محاسبه است، محاسبه فرکانس لحظه‌ای از مدهای ذاتی محتوای زمان-فرکانس داده را به دست می‌دهد. شایان ذکر است که محاسبه فرکانس لحظه‌ای مثبت می‌تواند از مؤلفه‌های تبدیل‌های دیگری مانند تبدیل موجک نیز صورت گیرد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۹). نمایش فرکانس لحظه‌ای حاصل از تجزیه مد تجربی برحسب زمان و دامنه را طیف فرکانس لحظه‌ای یا طیف هیلبرت می‌نامند. این ترکیب در بعضی مقالات تبدیل هیلبرت-هوانگ نیز نامیده شده است. از آنجا که به‌دست آوردن فرکانس لحظه‌ای مثبت از مؤلفه‌های روش‌های دیگری مانند تبدیل موجک نیز امکان‌پذیر است، به‌کاربردن اصطلاح تبدیل هیلبرت-هوانگ چندان رایج نیست و صحیح به نظر نمی‌رسد و در هوانگ و همکاران (۲۰۰۹) از نام ساده فرکانس لحظه‌ای معنادار استفاده شده است.

در نظر گرفته می‌شود و دوباره مراحل غربال‌گری روی آن صورت می‌گیرد تا مد ذاتی بعدی از آن استخراج شود. این فرآیند برای باقیمانده‌های بعدی نیز تکرار می‌شود تا تمامی مدهای ذاتی جدا شوند.

$$r_1 - c_2 = r_2, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n \quad (7)$$

تا زمانی که آخرین باقیمانده بیشتر از ۳ اکستریم داشته باشد، عمل جداکردن مدهای ذاتی از آن صورت می‌گیرد. رابطه بین مدهای جداشده و داده به صورت رابطه (۸) است:

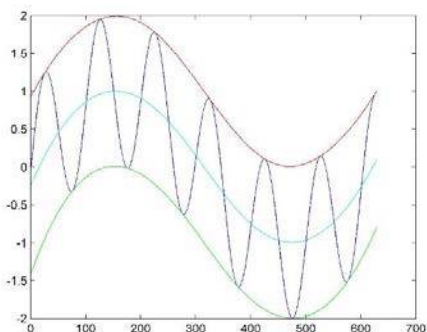
$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (8)$$

که نشان‌دهنده این است که داده به n مد تجربی و یک مقدار باقیمانده r_n تجزیه شده است.

۲.۲. روش EEMD

به دلیل مشکل ترکیب مد EMD، روش EEMD در سال ۲۰۰۹ معرفی شد. برای اطلاعات بیشتر درباره مشکل ترکیب مد و دیدن مثال می‌توان به وو و هوانگ (۲۰۰۹) مراجعه کرد، اما الگوریتم روش EEMD ساده است و در مراحل زیر خلاصه می‌شود:

۱. اضافه کردن نوفه سفید به داده؛
۲. تجزیه کردن داده با نوفه اضافه‌شده به وسیله روش EMD به IMFها؛
۳. بارها و بارها تکرار مرحله ۱ و ۲، اما با نوفه‌های سفید مختلف؛
۴. به دست آوردن میانگین IMFهای هم‌شماره حاصل از مرحله ۳ و در نظر گرفتن میانگین‌ها به عنوان IMFهای نهایی.



شکل ۱. منحنی آبی، یک سیگنال ساده؛ منحنی قرمز، پوش بالا؛ منحنی سبز، پوش پایین و منحنی لاجوردی مقدار میانگین است.

میانگین پوش بالا و پایین را به دست می‌آوریم؛ اگر میانگین پوش بالا و پوش پایین را با m_1 نمایش دهیم، تفاضل بین داده و m_1 اولین مؤلفه است و آن را با h_1 نشان می‌دهیم.

$$X(t) - m_1 = h_1 \quad (1)$$

در شکل ۱ پوش بالا و پوش پایین و مقدار میانگین آن‌ها برای یک سیگنال ساده نشان داده شده است. به صورت ایده‌آل، h_1 باید یک مد تجربی باشد، اما از آنجا که در عمل این فرآیند ممکن است در مورد بعضی از داده‌ها نقاط اکستریم جدید تولید کند، برای متقارن‌تر شدن h_1 و برآورده شدن شرط تابع مد ذاتی، باید این مرحله تکرار شود. در مرحله تکرار h_1 به عنوان داده در نظر گرفته می‌شود و مراحل بالا روی آن اجرا می‌شود تا h_{11} به دست آید.

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (2)$$

مرحله تکرار می‌تواند k بار تکرار شود تا زمانی که h_{1k} یک تابع مد ذاتی (IMF) باشد. به این مراحل تکرار غربال‌گری گفته می‌شود.

برای تضمین اینکه h_{1k} شروط گفته‌شده برای تابع مد ذاتی را به طور کامل برآورده کند، باید شرط توقفی برای پروسه غربال‌گری در نظر گرفته شود. بدین منظور انحراف معیار بین نتیجه دو غربال‌کردن متوالی، به عنوان شرط توقف در نظر گرفته شده است.

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (3)$$

زمانی که انحراف معیار بین $0/2$ و $0/3$ باشد، غربال‌کردن متوقف می‌شود. h_{1k} را به عنوان IMF اول با c_1 نمایش می‌دهیم. می‌توان نوشت:

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad (4)$$

$$c_1 = h_{1k} \quad (5)$$

که در آن، در حالت کلی c_1 باید حاوی کوچک‌ترین مقیاس‌ها یا بزرگ‌ترین فرکانس‌ها باشد. با تفاضل c_1 از داده اولیه مقدار باقیمانده به دست می‌آید.

$$X(t) - c_1 = r_1 \quad (6)$$

چون مقدار باقیمانده هنوز ممکن است حاوی داده‌هایی با فرکانس پایین‌تر باشد، به عنوان داده جدید

$$R = x - \sum_1^k \overline{IMF}_k \quad (14)$$

که در آن، k تعداد کل توابع مد ذاتی است و رابطه بین مدهای ذاتی و سیگنال به صورت زیر است:

$$x = \sum_1^k \overline{IMF}_k + R \quad (15)$$

۳. فرکانس لحظه‌ای و طیف فرکانس لحظه‌ای

به جای نمایش دادن به وسیله طیف فوریه مختلط می‌توان آن را به صورت زیر نمایش داد که در آن $a(t)$ دامنه لحظه‌ای و $\varphi(t)$ فاز لحظه‌ای و $x(t)$ داده مورد نظر است (اینگل هارد، ۱۹۹۶).

$$x(t) = a(t)\cos\varphi(t) \quad (16)$$

فرکانس لحظه‌ای از مشتق فاز یعنی $\varphi(t)$ حاصل می‌شود:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (17)$$

برای به دست آوردن $\omega(t)$ از سیگنال تحلیلی استفاده می‌کنیم. برای یک سیگنال $x(t)$ که در حوزه زمان است، این سیگنال برابر است با:

$$z(t) = a(t)e^{i\varphi(t)} = x(t) + iy(t) \quad (18)$$

که در آن، قسمت حقیقی همان سیگنال $x(t)$ است و قسمت موهومی $y(t)$ عمود بر $x(t)$ است.

$$y(t) = a(t)\sin\varphi(t) \quad (19)$$

چون $x(t)$ و $y(t)$ بر یکدیگر عمود هستند، بنابر این یک زوج تبدیل هیلبرت را تشکیل می‌دهند:

$$x(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{\tau-t} d\tau = H(y(t)), \quad (20)$$

$$y(t) = \frac{1}{\pi} p \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{\tau-t} d\tau = -H(x(t)), \quad (21)$$

که در آن، p عبارت است از مقدار قضیه کوشی در $\tau = t$. مقدار دامنه لحظه‌ای $a(t)$ و فاز لحظه‌ای $\varphi(t)$ به صورت زیر با سیگنال تحلیلی مرتبط است:

$$a^2(t) = x^2(t) + y^2(t) \quad (22)$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right) \quad (23)$$

برای انتقال داده به حوزه زمان-فرکانس با استفاده از رابطه ۱ و محاسبه فرکانس لحظه‌ای از روابط ۲ تا ۸ در مورد بعضی از داده‌ها مشکلاتی ایجاد می‌شود: اول اینکه فرکانس لحظه‌ای به دست آمده برای بعضی داده‌ها ممکن

۳.۲. روش CEEMD

از آنجا که روش EEMD برای برطرف کردن مشکل ترکیب مد از اضافه کردن نوفه استفاده می‌کند، داده بازسازی شده از مدهای ذاتی، حاوی مقداری نوفه باقیمانده است. همچنین اضافه کردن نوفه‌های گوسی مختلف ممکن است باعث تولید مدهای ذاتی مختلف شود (تورس و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین روش CEEMD با استفاده از مراحل زیر این مشکلات را حل می‌کند. در اینجا توابع مد ذاتی با \overline{IMF}_k نمایش داده می‌شود. برای توضیح الگوریتم ما اپراتور $E_j(\cdot)$ را تعریف می‌کنیم که مد ذاتی ω^i محاسبه شده به روش EMD را به دست می‌دهد و فرض می‌کنیم که ω^i نوفه سفید با انحراف معیار $N(0,1)$ و x داده اصلی و ε_0 یک ضریب ثابت باشد.

۱. تعداد I دفعه مد ذاتی اول $\varepsilon_0 \omega^i + x$ به وسیله EMD محاسبه شده و مد ذاتی اول CEEMD به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$\overline{IMF}_1 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_1^i \quad (9)$$

سپس مقدار باقیمانده اول از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$r_1 = x - \overline{IMF}_1 \quad (10)$$

۲. در این مرحله I دفعه تابع مد ذاتی اول $\varepsilon_1 E_1(\omega^i) + r_1$ که $i = 1, \dots, I$ را محاسبه می‌کنیم و تابع مد ذاتی دوم را به دست می‌آوریم.

$$\overline{IMF}_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_1 + \varepsilon_1 E_1(\omega^i)) \quad (11)$$

۳. برای $k = 2, \dots, k$ مقدار باقیمانده به صورت رابطه (۱۲) است:

$$r_k = r_{k-1} - \overline{IMF}_k \quad (12)$$

۴. I دفعه تابع مد ذاتی اول $\varepsilon_k E_k(\omega^i) + r_k$ که $i = 1, \dots, I$ را محاسبه می‌کنیم و تابع مد ذاتی $(k+1)$ ام را به دست می‌آوریم.

$$\overline{IMF}_{(k+1)} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_k(r_k + \varepsilon_k E_k(\omega^i)) \quad (13)$$

۵. برای محاسبه k بعدی به مرحله ۴ بازمی‌گردیم. تا زمانی که باقیمانده بیشتر از ۱۳ اکستریم داشته باشد، فرایند استخراج توابع مد ذاتی صورت می‌گیرد و مقدار باقیمانده آخر برابر است با:

دوبعدی از توزیع فرکانس‌های موجک در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. در صورتی که دامنه لحظه‌ای موجک‌های ریکر را به عنوان بعد سوم در نظر گرفته و در یک تصویر رنگی نمایش دهیم، نمایش زمان-فرکانسی همچون نمایش‌های زمان-فرکانس موجود (طیف نگاشت تبدیل S، طیف نگاشت STFT) به دست می‌آید که آن را طیف فرکانس لحظه‌ای یا طیف هیلبرت می‌نامند (شکل ۲-ب).

۴. مراحل تجزیه داده به فرکانس لحظه‌ای و

خصوصیات این نوع تجزیه داده

در مورد سیگنال‌هایی که شرایط محاسبه فرکانس لحظه‌ای معنادار را برآورده نمی‌کنند، می‌توان از مراحل زیر برای تجزیه زمان-فرکانس و تشکیل طیف فرکانس لحظه‌ای استفاده کرد:

۱. تجزیه داده به مدهای ذاتی؛
۲. گرفتن تبدیل هیلبرت از هر کدام از مدهای ذاتی و تشکیل سیگنال تحلیلی؛
۳. محاسبه دامنه لحظه‌ای و فرکانس لحظه‌ای؛
۴. نمایش همزمان کمیت‌های زمان، فرکانس لحظه‌ای و دامنه لحظه‌ای در یک شکل رنگی به منظور تشکیل طیف هیلبرت.

بعد از تجزیه داده مطابق مراحل فوق، فرکانس لحظه‌ای و دامنه لحظه‌ای مدهای ذاتی در اختیار است که این فرکانس‌ها و دامنه‌ها در حقیقت همان محتوای فرکانسی متغیر با زمان داده‌اند و می‌توان با استفاده از این فرکانس‌ها داده را پردازش کرد.

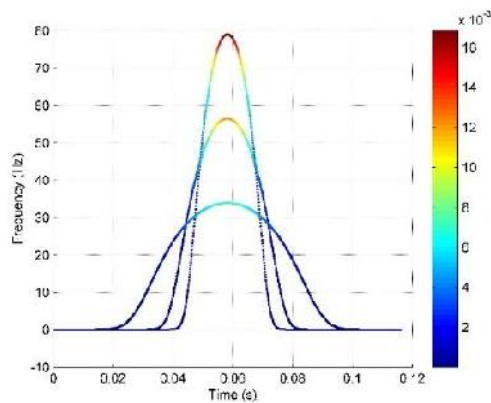
در مورد خصوصیات این نوع تجزیه زمان-فرکانس می‌توان به موارد مهمی اشاره کرد؛ مهم‌ترین موضوع در زمینه تجزیه‌های زمان-فرکانس قدرت تفکیک است. همان‌طور که می‌دانیم دو نوع قدرت تفکیک در صفحه زمان-فرکانس وجود دارد: اول قدرت تفکیک زمانی؛ به این معنی که فرکانس‌های مربوط به یک زمان از چه بازه زمانی داده محاسبه شده است. به عنوان مثال در تبدیل فوریه ساده فرکانس‌های به‌دست آمده مربوط به تمام طول داده است و در مورد تبدیل فوریه زمان کوتاه

است مقادیر منفی به دست دهد که از نظر فیزیکی بی‌معناست. دوم اینکه در صورت محاسبه فرکانس لحظه‌ای یک داده چندمقیاسی که در هر زمان به باندهای فرکانسی متفاوتی قابل تفکیک است، تنها یک فرکانس در هر زمان در اختیار قرار می‌گیرد که در این صورت مزیت خاصی برای پردازشگر ایجاد نمی‌شود. این موضوع بر این نکته تأکید دارد که برای داده‌های ناپایا، قبل از محاسبه فرکانس لحظه‌ای، داده باید به باندهای فرکانسی مجزایی تجزیه شود و سپس فرکانس لحظه‌ای از این بخش‌های جداگانه محاسبه گردد.

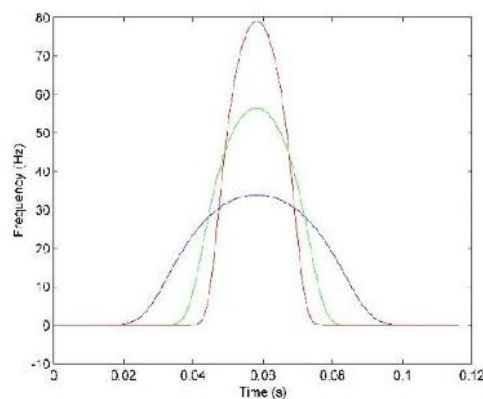
روش‌هایی مانند تجزیه مد تجربی، داده را به بخش‌هایی که گفته شد تجزیه می‌کند که اولاً این بخش‌ها فرکانس‌های لحظه‌ای مثبت تولید می‌کنند و ثانیاً در یک زمان، هر کدام از مدهای ذاتی فرکانس لحظه‌ای دیگر موجود در آن زمان را به دست می‌دهند. همان‌طور که در بخش قبل هم گفته شد، مدهای ذاتی دارای دو خصوصیت هستند: اول اینکه در آن‌ها تعداد نقاط صفر گذر با تعداد نقاط بیشینه یا کمینه برابر است یا حداکثر یکی اختلاف دارند و دوم اینکه نسبت به میانگین صفر متقارن هستند. در مورد سیگنال‌هایی که این دو شرط را دارا هستند، فرکانس لحظه‌ای به‌دست آمده نشان‌دهنده توزیع زمان-فرکانس داده است. هوانگ و همکاران (۲۰۰۹) به دو شرط اساسی به نام‌های شروط بدروسیان و نوتال اشاره کرده‌اند که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به آن مراجعه کرد.

برای مثال در شکل ۲-الف فرکانس لحظه‌ای ۳ موجک ریکر جداگانه با فرکانس‌های مرکزی ۳۰ هرتز، ۵۰ هرتز و ۷۰ هرتز روی یک نمودار رسم شده است. چون موجک ریکر شرایط یک مد ذاتی را برآورده می‌کند، بنابراین فرکانس لحظه‌ای آن نشان‌دهنده توزیع زمان-فرکانس آن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۱-الف با زیاد شدن فرکانس مرکزی موجک، قله فرکانس لحظه‌ای به اطراف فرکانس مرکزی موجک منتقل می‌شود و چون شیب قسمت‌های جانبی نمودار بیشتر می‌شود، به این معنی است که فرکانس‌های لحظه‌ای در نقاط بالاتر تجمع پیدا کرده‌اند. شکل ۲-الف نموداری

بین ۲۵ تا ۳۵ هرتز است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقاطع فرکانس ثابت مربوط به تبدیل S و فرکانس لحظه‌ای هر دو ناحیه کم‌فرکانس مربوط به مخزن را آشکار کرده‌اند. مقطع فرکانس ثابت تبدیل S (شکل ۴-ب) در مقایسه با مقطع فرکانس ثابت حاصل از فرکانس لحظه‌ای (شکل ۴-ب) دارای برتری‌هایی است. به‌عنوان مثال ناحیه روشن در شکل ۴-الف متمرکزتر بوده و به بازتابنده‌های محدوده مخزن محدود است و در ناحیه وسیع‌تری گسترده نشده است. این امر نشانگر قدرت تفکیک بالای طیف فرکانس لحظه‌ای است. نمایش زمان-فرکانس تبدیل‌های دیگر به دلیل عدم قطعیتی که در تعیین فرکانس و زمان دارند، از وضوح کمتری برخوردارند و اطلاعات در یک باند فرکانسی گسترده می‌شوند.



(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) فرکانس لحظه‌ای حاصل از سه موجک ریکر ۳۰ هرتز (آبی)، ۵۰ هرتز (سبز) و ۷۰ هرتز (قرمز) که در یک نمودار با هم رسم شده‌اند و (ب) طیف فرکانس لحظه‌ای حاصل از سه موجک ریکر ۳۰ هرتز، ۵۰ هرتز و ۷۰ هرتز.

فرکانس‌های به‌دست‌آمده در هر زمان به طول پنجره تبدیل فوریه زمان کوتاه مربوط هستند. هرچه فرکانس‌های به‌دست‌آمده به بازه زمانی کوتاه‌تری مربوط باشند، قدرت تفکیک زمانی بیشتر است و در عملیات پردازش در صورت اعمال تغییر روی فرکانس‌های مربوط به یک زمان، داده‌های موجود در زمان مجاور دستخوش تغییر کمتری می‌شوند. دوم قدرت تفکیک فرکانسی است و به این معنی است که فرکانس‌های مربوط به یک زمان در صفحه زمان-فرکانس از چه تعداد فرکانس یا از چه بازه فرکانسی تشکیل شده‌اند. هرچه فرکانس‌های نسبت داده‌شده به یک زمان کمتر باشد یا به عبارت دیگر به‌صورت بازه‌ای از اعداد حقیقی نباشد، قدرت تفکیک فرکانسی بیشتر است و در عملیات پردازش نتایج بهتری حاصل می‌شود.

بالاترین قدرت تفکیک زمانی، از طریق فرکانس لحظه‌ای حاصل می‌شود و روش‌های تجزیه‌ای مانند تجزیه مدت‌تجربی قدرت تفکیک فرکانسی را بهبود بخشیده‌اند. بنابراین استفاده از تجزیه داده به فرکانس لحظه‌ای که در بالا توضیح داده شد، به سبب قدرت تفکیک بالا در پردازش داده، مزیت‌هایی ایجاد می‌کند. به‌طور مثال در بحث تجزیه طیفی باعث متمرکز شدن ناحیه روشن می‌شود یا در خصوص حذف نوفه تصادفی از داده، فرکانس‌های بالا را جدا نمی‌کند. در ادامه به این مسائل با ذکر مثال پرداخته شده است.

۵. تجزیه طیفی به کمک فرکانس لحظه‌ای

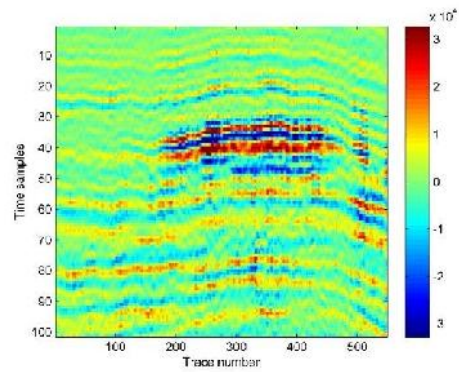
همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، می‌توان با استفاده از فرکانس لحظه‌ای و تجزیه مدت‌تجربی نمایش زمان-فرکانسی از داده به دست آورد. از طیف به‌دست‌آمده می‌توان برای تهیه مقاطع فرکانس ثابت و شناسایی نواحی خاصی از مقطع که دارای خصوصیات فرکانسی مشخصی هستند، استفاده کرد. در شکل ۳ یک مقطع لرزه‌ای واقعی از یک مخزن نشان داده شده است. مقاطع فرکانس ثابت این داده به وسیله روش تبدیل S و فرکانس لحظه‌ای در شکل ۴ نمایش داده شده است. این مقاطع حاصل برهم‌نهی مقاطع تک‌فرکانس برای فرکانس‌های

فرکانس‌های مربوط به نوفه تصادفی عموماً فرکانس‌های بالا هستند، با حذف این مؤلفه‌ها و گرفتن عکس تبدیل، انتظار می‌رود نوفه تضعیف شود. حذف بعضی از مؤلفه‌های فرکانس در این حوزه نیازمند طراحی فیلتری نرم و هموار است تا بعد از گرفتن عکس تبدیل پدیده گیس اتفاق نیفتد. استفاده از سایر تبدیل‌های زمان فرکانس مرسوم مانند تبدیل S، تبدیل موجک و... که محتوای فرکانسی سیگنال را بر حسب زمان به دست می‌آورند نیز مانند تبدیل فوریه برای گرفتن عکس تبدیل حساس هستند. همچنین به دلیل مشکل قدرت تفکیک آن‌ها در حذف فرکانس‌های بالا از داده، علاوه بر نوفه، فرکانس‌های بالای مربوط به سیگنال مفید نیز برداشته می‌شود.

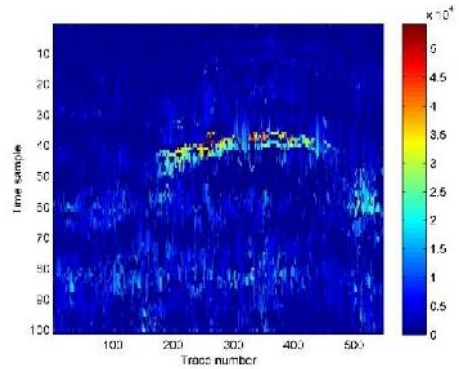
حذف نوفه تصادفی با استفاده از تجزیه مد تجربی و بدون استفاده از طیف فرکانس لحظه‌ای نیز مرسوم است که در آن بعد از تجزیه داده به زیرمجموعه‌های مدهای ذاتی، مد ذاتی اول به عنوان نوفه در نظر گرفته شده و حذف می‌شود. این روش حساسیت عکس تبدیل را نداشته و اجرای آن ساده است اما بخش‌هایی از نوفه که در سایر مدهای ذاتی وجود دارد، دست‌نخورده باقی می‌ماند. علاوه بر آن در فرآیند حذف مد ذاتی اول به طور معمول فرکانس‌های بالای مربوط به داده نیز همراه با مد ذاتی اول بیرون ریخته می‌شود (شکل ۵).

با توجه به اینکه روش پیشنهادی فرکانس لحظه‌ای مشکلات مطرح‌شده روش‌های قبلی را ندارد و نوفه‌های موجود در سایر مدهای ذاتی را هم تشخیص می‌دهد، می‌تواند ابزاری مناسب برای حذف نوفه از داده‌های لرزه‌ای باشد.

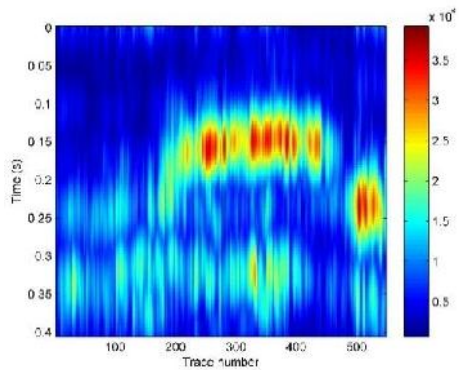
به منظور بررسی توانمندی روش روی داده واقعی، از رکورد لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۶-الف استفاده شده است. برای هر ردلرزه بعد از تجزیه به مدهای ذاتی و فرکانس لحظه‌ای، دامنه‌های مربوط به فرکانس‌های نوفه از مدهای ذاتی آن حذف شده و از جمع مدهای ذاتی باقیمانده ردلرزه فیلتر شده به دست آمده است. نتایج در شکل ۶-ب و مقدار باقیمانده در شکل ۶-ج قابل مشاهده است. همچنین به دلیل اینکه حذف نوفه از مقاطع



شکل ۳. یک مقطع لرزه‌ای واقعی حاوی مخزن.



(الف)



(ب)

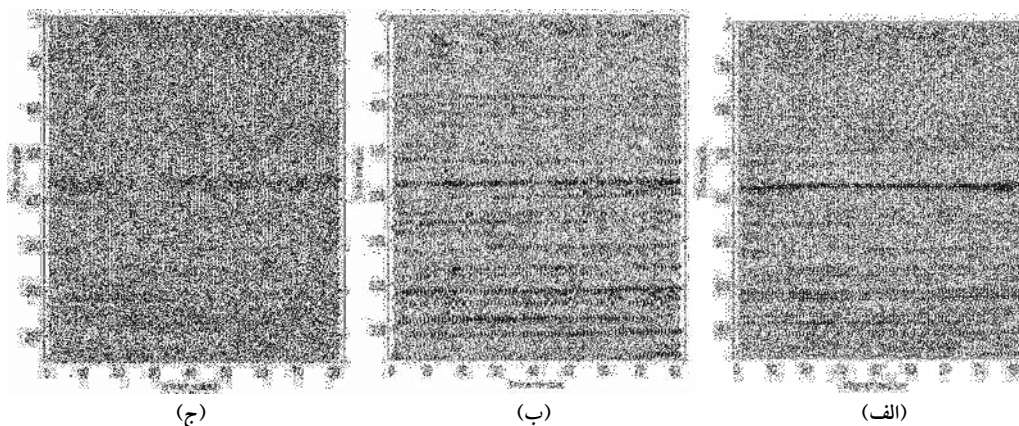
شکل ۴. مقطع فرکانس ثابت حاصل از برهم‌نهی مقاطع فرکانس ثابت از ۲۵ تا ۳۵ هرتز؛ (الف) با استفاده از روش پیشنهادی و (ب) با استفاده از تبدیل S.

۶. تضعیف نوفه تصادفی با استفاده از طیف فرکانس لحظه‌ای

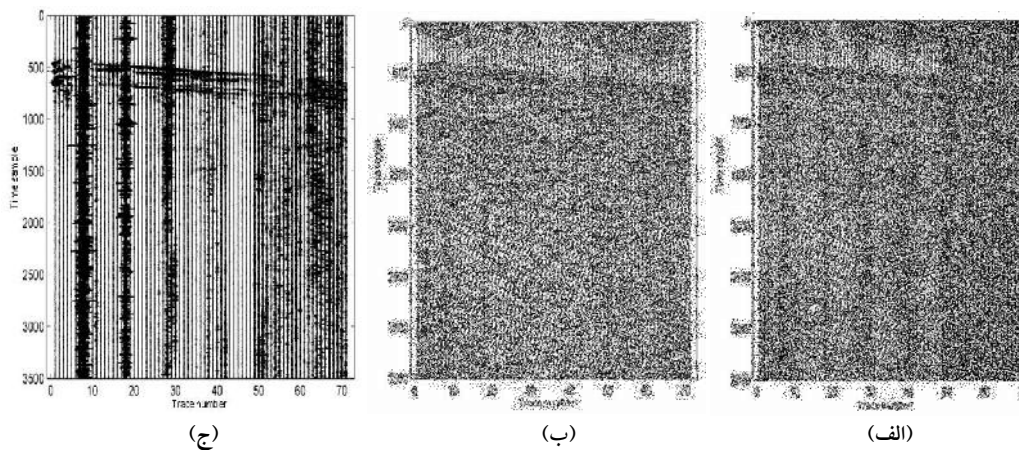
در این بخش یکی دیگر از کاربردهای طیف فرکانس لحظه‌ای بررسی شده است. همان‌گونه که می‌دانیم تضعیف دیجیتالی نوفه با استفاده از تبدیل‌های ریاضی صورت می‌گیرد که داده را از حوزه زمان به حوزه دیگری مانند حوزه فرکانس می‌برند. از ابتدایی‌ترین این تبدیل‌های ریاضی، تبدیل فوریه است. تبدیل فوریه داده را به فرکانس‌های تشکیل‌دهنده تجزیه می‌کند. چون

داده تفاضل در ناحیه بین نمونه زمانی ۲۴۰ تا ۲۸۰ از داده اصلی مقداری کم نشده است و با توجه به اینکه این ناحیه محدود به داده مفید ماست، می توان گفت که روش پیشنهادی به سیگنال آسیبی نرسانده است. زیرا داده مربوط به بازتابندها از برانبارش به دست آمده و در عمل بدون نوفه است.

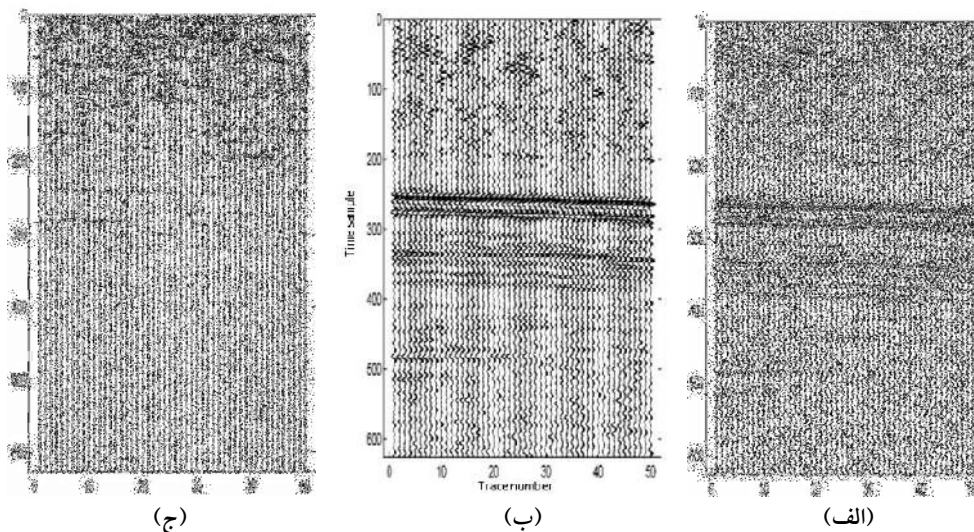
برانبارش شده لرزه ای دارای حساسیت بیشتری است (چون فرکانس های نوفه به فرکانس های داده مفید نزدیک تر است و عمل فیلتر کردن را دشوار می سازد) عملکرد روش روی مقطع برانبارش شده لرزه ای شکل ۷ نیز بررسی و نتایج حاصل از حذف نوفه نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۷-ج قابل مشاهده است، در



شکل ۵. (الف) بخشی از یک داده برانبارش شده، (ب) داده پردازش شده که تفکیک عمودی آن بر اثر حذف مد ذاتی اول کاهش یافته است و (ج) مقدار تفاضل.

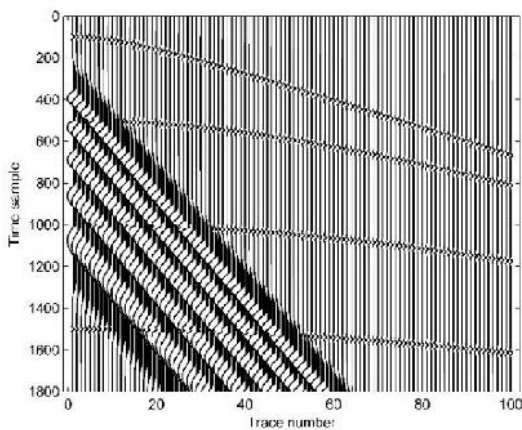


شکل ۶. (الف) بخشی از یک رکورد لرزه ای واقعی دارای نوفه، (ب) داده فیلتر شده به وسیله طیف فرکانس لحظه ای و (ج) مقدار باقیمانده.

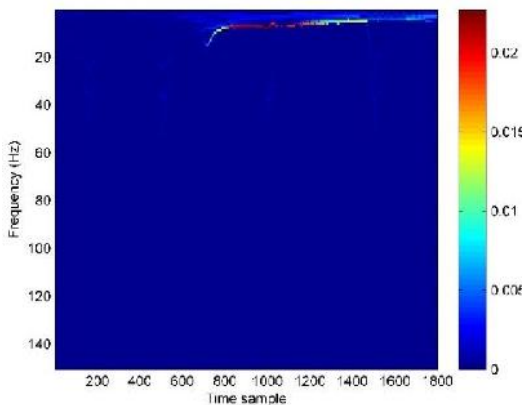


شکل ۷. (الف) یک inline از مکعب برانبارش شده لرزه ای دارای نوفه، (ب) داده فیلتر شده به وسیله فرکانس لحظه ای و (ج) مقدار تفاضل بین داده.

فرکانس ردلرزه‌ها، یک ردلرزه اختیاری حاوی موج زمین‌غلت با روش CEEMD تجزیه شده و طیف فرکانس لحظه‌ای حاصل از آن در شکل ۹-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این طیف فرکانس‌های مربوط به امواج با دامنه زیاد و فرکانس کم از بازتاب‌ها تفکیک شده است و به منظور حذف موج زمین‌غلت باید انرژی محدوده زمانی ۶۰۰ تا ۱۸۰۰ و فرکانس‌های ۷ تا ۱۵ هرتز از طیف حذف شود. این امر به وسیله حذف دامنه‌های مدهای ذاتی متناظر با فرکانس‌هایی که در این محدوده قرار دارند، صورت می‌گیرد و مدهای ذاتی باقیمانده با یکدیگر جمع می‌شوند. داده فیلترشده بدون موج زمین‌غلت در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

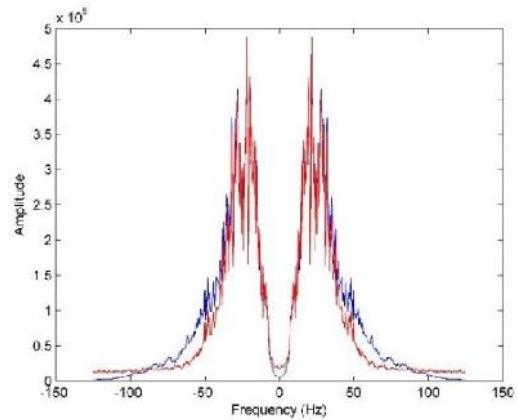


(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف) داده مصنوعی حاوی امواج زمین‌غلت، (ب) طیف فرکانس لحظه‌ای یکی از رد لرزه‌های حاوی موج زمین‌غلت.



شکل ۸. مقایسه طیف دامنه میانگین محاسبه‌شده از ردلرزه‌های داده شکل ۶؛ منحنی آبی به داده اصلی و منحنی قرمز به داده فیلترشده مربوط است.

در شکل ۸ مقایسه میانگین طیف دامنه داده اصلی و داده فیلترشده (نشان داده شده در شکل ۷) صورت گرفته است. همان‌طور که از شکل مشخص است، فرکانس‌های محدوده ۴۰ تا ۹۰ هرتز به تمامی حذف نشده‌اند (اتفاقی که در فیلتر پایین‌گذر یا حذف اولین مد ذاتی روی می‌دهد) بلکه عمدتاً سهم مربوط به نوفه تضعیف شده است. دوباره قابل ذکر است که فیلتر کردن داده به کمک طیف هیلبرت به صورت محلی انجام می‌شود و حذف فرکانس لحظه‌ای مربوط به یک قسمت از داده برخلاف فیلتر فرکانسی بر کل داده تأثیر نمی‌گذارد.

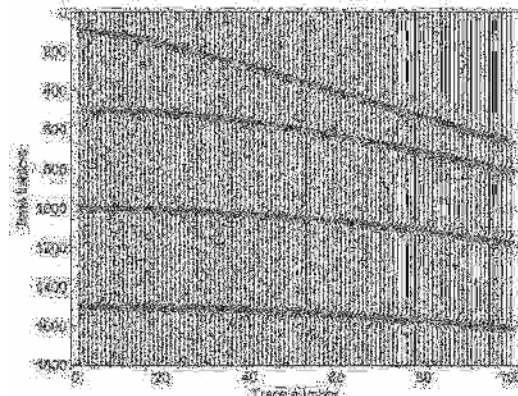
۷. حذف امواج زمین‌غلت با استفاده از طیف هیلبرت حذف موج زمین‌غلت با استفاده از طیف هیلبرت بر پایه این حقیقت استوار است که فرکانس‌های مربوط به امواج زمین‌غلت عموماً به‌طور شایان توجهی پایین‌تر از فرکانس‌های امواج بازتابی هستند و همچنین دامنه این امواج بزرگ‌تر از دامنه امواج بازتابی است. با تجزیه داده به حوزه زمان-فرکانس با روش پیشنهادی، عمل حذف موج زمین‌غلت می‌تواند با حذف فرکانس‌های لحظه‌ای مربوط به موج زمین‌غلت از طیف فرکانس لحظه‌ای صورت گیرد.

در شکل ۹-الف داده مصنوعی با چهار بازتابنده با فرکانس مرکزی ۳۰ هرتز و امواجی با فرکانس کم و متغیر با زمان و همچنین دامنه زیاد به‌عنوان امواج زمین‌غلت نشان داده شده است. برای مشاهده محدوده

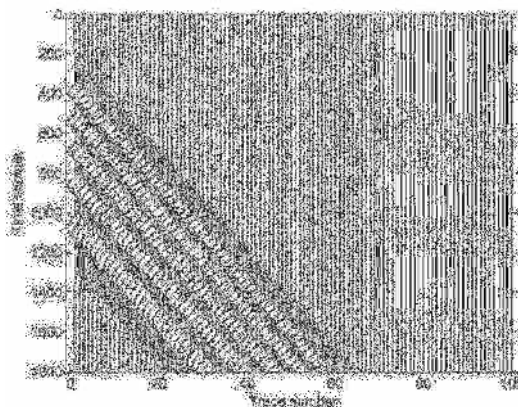
مدهای ذاتی حذف شده‌اند، بنابراین ممکن است مقدار کمی از نوفه‌ای که طی الگوریتم CEEMD به داده اضافه شده است، خود را آشکار کند (شکل ۱۰-الف) که با کاهش پارامتر ϵ در الگوریتم می‌توان آن را به حد ناچیز رساند. همچنین مقایسه طیف دامنه میانگین داده مصنوعی شکل ۹ و داده فیلترشده آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، فرکانس‌های کم با دامنه زیاد مربوط به موج زمین‌غلت فرضی حذف شده‌اند.

برای اطمینان از عملکرد روش روی داده واقعی، در شکل ۱۲ یک داده لرزه‌ای واقعی حاوی موج زمین‌غلت و داده فیلترشده آن به وسیله این روش نمایش داده شده است که نشان می‌دهد این روش، موج زمین‌غلت را از داده برداشته است.

در مورد نتایج شکل ۱۲ و همچنین خصوصیات حذف امواج زمین‌غلت به وسیله روش گفته‌شده می‌توان گفت در صورتی که فرکانس لحظه‌ای بازتابنده‌ها با فرکانس لحظه‌ای امواج زمین‌غلت تداخل داشته باشد، عمل فیلتر کردن فرکانس لحظه‌ای، آن بخش از بازتابنده را که با فرکانس‌های امواج زمین‌غلت تداخل داشته باشد، از داده جدا می‌کند. این امر را در برخی نقاط داده تفاضل در شکل ۱۲-ج می‌توان دید، اما به دلیل قدرت تفکیک خوب روش پیشنهادی، این امر کمتر اتفاق می‌افتد و همچنین ممکن است خطاهای مشاهده‌شده در شکل ۱۲-ج ناشی از بعضی خطاهای الگوریتم باشد؛ در هر صورت این خطاها کوچک هستند و در مقایسه با حذف امواج زمین‌غلت از داده، می‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. اما در مورد نقطه قوت این روش در مقایسه با فیلتر سرعتی در حوزه $f-k$ برای حذف موج زمین‌غلت می‌توان گفت اهمیتی ندارد که چه اندازه طیف $f-k$ موج زمین‌غلت با امواج بازتابی هم‌پوشانی داشته باشد (به عبارت دیگر سرعت امواج زمین‌غلت نزدیک به سرعت امواج بازتابی باشد)؛ در هر صورت روش طیف فرکانس لحظه‌ای موفق عمل می‌کند.

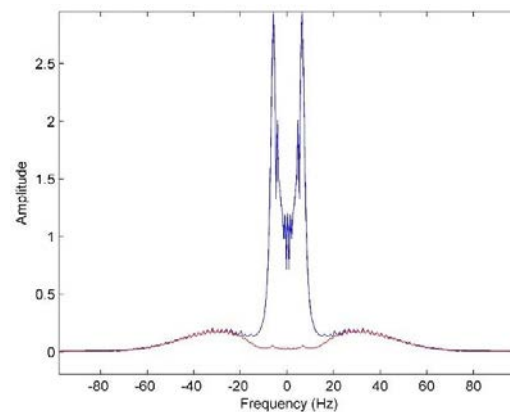


(الف)



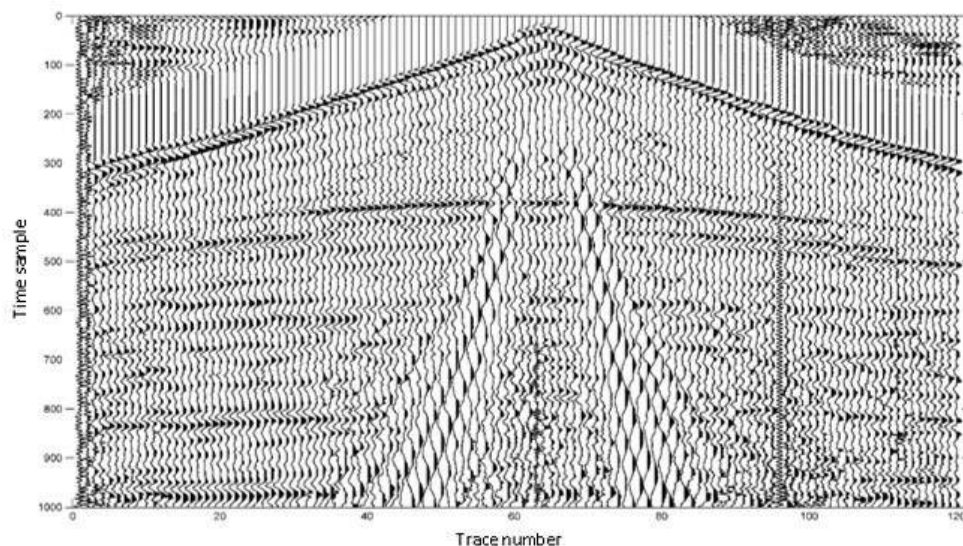
(ب)

شکل ۱۰. الف) داده پاکسازی شده شکل ۹-الف و (ب) مقدار باقیمانده.

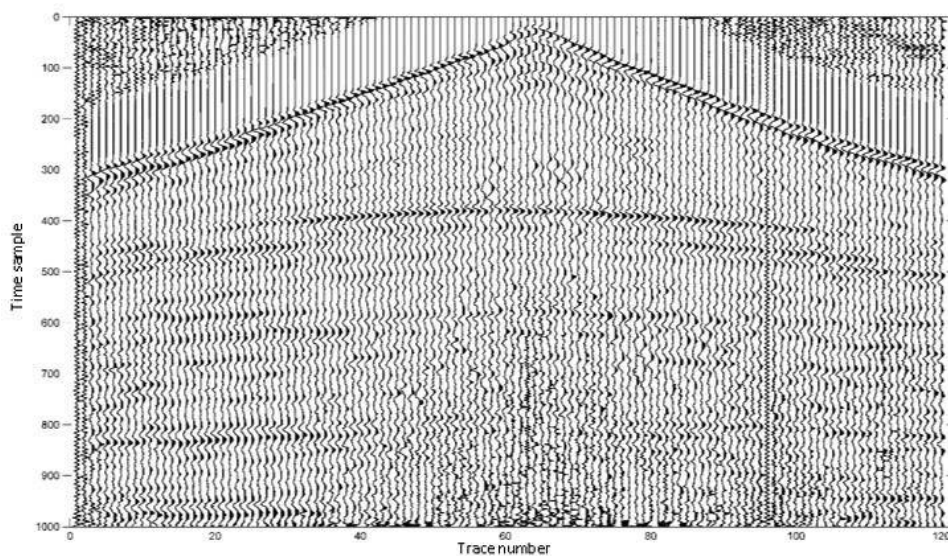


شکل ۱۱. مقایسه طیف دامنه میانگین محاسبه‌شده از ردلرزه‌های داده شکل ۹-الف و ۱۰-الف؛ منحنی آبی به داده مصنوعی اولیه و منحنی قرمز به داده فیلترشده مربوط است.

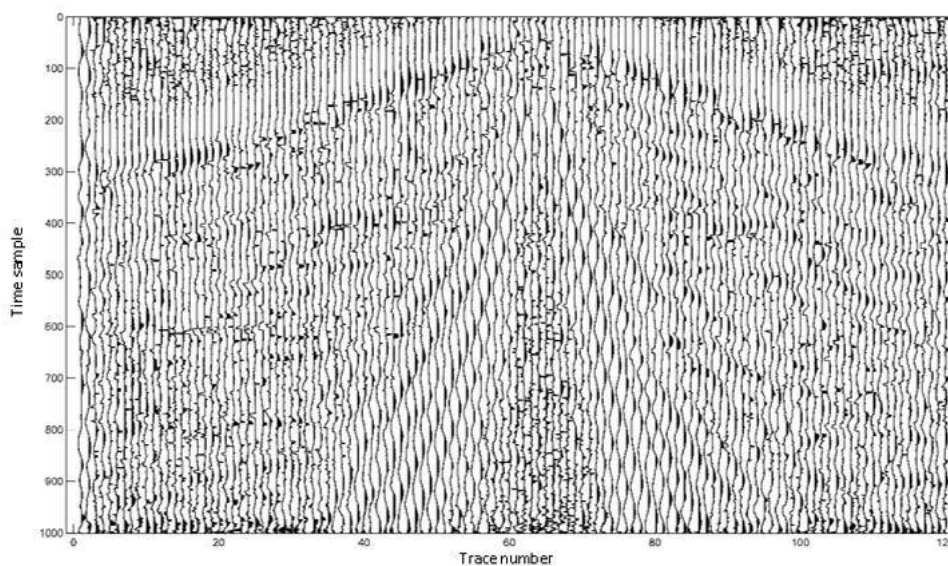
حذف فرکانس‌های پایین از طیف فرکانس لحظه‌ای به این معنی است که از جمع مدهای ذاتی، داده اولیه بازسازی نمی‌شود؛ بلکه داده بازسازی شده داده‌ای فاقد فرکانس‌های فیلترشده است. چون این فرکانس‌ها از



(الف)



(ب)



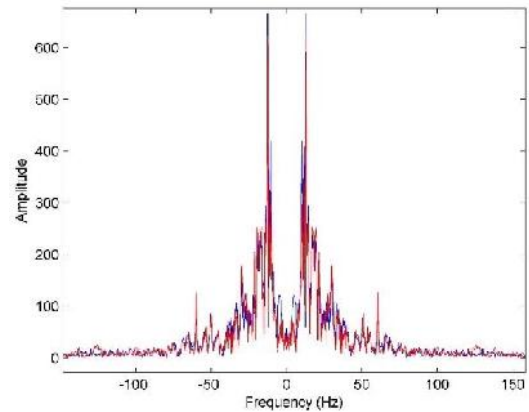
(ج)

شکل ۱۲. (الف) یک داده لرزه‌ای واقعی حاوی موج زمین‌گلت، (ب) داده فیلترشده به وسیله روش پیشنهادی و (ج) مقدار تفاضل.

مقاطع لرزه‌ای وضعیتی را در نظر بگیرید که نوفه تصادفی تا زمان مربوط به بازتابنده وجود داشت باشد. سپس در طول زمان بازتاب نوفه‌ای نباشد و بعد از بازتاب دوباره نوفه وجود داشته باشد (که در مقاطع برانبارش شده عموماً شرایط این چنین است). در این وضعیت با استفاده از روش‌هایی که بر پایه تبدیل فوریه هستند، به طور قطع مقادیری از بازتابنده‌ها به عنوان نوفه از آن‌ها جدا می‌شود؛ چرا که حذف فرکانس‌های نوفه‌های مجاور بازتابنده روی بازتابنده نیز تأثیر می‌گذارد، اما در صورتی که روش به کار برده شده دارای قدرت تفکیک بیشتری باشد، ناحیه بازتابنده دست‌نخورده باقی می‌ماند؛ مانند شکل ۷. در حذف موج زمین‌غلت نیز می‌توان به ویژگی مهم وابسته‌بودن روش به سرعت امواج زمین‌غلت اشاره کرد. اما در مورد استفاده از تجزیه داده به فرکانس لحظه‌ای و استفاده از آن در پردازش داده لرزه‌ای که موضوع این مقاله است، باید گفت که بهترین قدرت تفکیک زمان-فرکانس از طریق فرکانس لحظه‌ای حاصل می‌شود و همان‌طور که گفته شد یکی از روش‌هایی که داده را برای محاسبه فرکانس لحظه‌ای مهیا می‌کند، روش تجزیه مد تجربی است. هرچند که ممکن است این روش‌ها دارای کاستی‌هایی باشند اما در حال توسعه و بهبود هستند و امکان محاسبه فرکانس لحظه‌ای صحیح در حال بهبود است. امید آن می‌رود که نتایج بیان‌شده در این نوشتار به شناسانده شدن مزیت‌های استفاده از این نوع روش‌ها و توسعه آن‌ها کمک کند.

۹ نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تجزیه داده مبتنی بر تجزیه مد تجربی و فرکانس لحظه‌ای (طیف هیلبرت) معرفی شد. به منظور آشنایی با مراحل اعمال روش و همچنین مزایای آن سه کاربرد از پردازش و تفسیر داده لرزه‌ای شامل تشخیص سایه کم‌فرکانس مخزن، حذف نوفه تصادفی و حذف امواج زمین‌غلت ارائه شد. همچنین این روش در مورد هر یک از سه کاربرد گفته‌شده دارای ویژگی‌هایی است که



شکل ۱۳. مقایسه طیف دامنه میانگین محاسبه‌شده از ردلرزه‌های داده شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب؛ منحنی آبی مربوط به داده اولیه و منحنی قرمز مربوط به داده فیلتر شده است.

در شکل ۱۳ طیف میانگین داده شکل ۱۲ و داده فیلترشده آن مقایسه شده است. از مقایسه این دو منحنی می‌توان به این نتیجه رسید که دامنه فرکانس‌های پایین (۷ تا ۱۵ هرتز) تضعیف شده‌اند. همچنین می‌توان به این نتیجه رسید که طراحی فیلتری در حوزه فرکانس برای حذف امواج زمین‌غلت عملی به نظر نمی‌رسد.

۸ بحث

نتایج نشان داده‌شده در مورد شناسایی سایه کم‌فرکانس، حذف نوفه تصادفی و حذف امواج زمین‌غلت با استفاده از تجزیه مد تجربی و طیف فرکانس لحظه‌ای حاوی نکاتی است که هر چند در طول مقاله به آن اشاره شد، اما می‌توان مفصل‌تر در این بخش درباره آن‌ها بحث کرد. در بخش مقاطع فرکانس ثابت حاصل از طیف فرکانس لحظه‌ای، متمرکز شدن ناحیه روشن و محدود شدن آن به بازتابنده‌ها می‌تواند اطلاعات بیشتری در مقایسه با روش‌های مرسوم دیگر در اختیار قرار دهد. به عنوان مثال از مقاطع فرکانس لحظه‌ای ثابت می‌توان پی برد که سایه کم‌فرکانس دقیقاً از کدام لایه مقطع شروع شده و در کدام لایه تمام شده است. از طرف دیگر پی‌بردن به تغییرات فرکانسی داده در طول زمان انتشار به صورت دقیق مزیت مهمی است که از طریق طیف فرکانس لحظه‌ای قابل دستیابی است. در حذف نوفه تصادفی از

مراجع

- روشندل کاهو، ا. و نجاتی کلانه، ع.، ۱۳۸۹، تضعیف نوفه‌های اتفاقی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد تجربی، م. ژئوفیزیک ایران، ۵(۲)، ۶۱-۶۸.
- Baseem, S., 2011, De-noising seismic data by Empirical Mode Decomposition, Master Thesis in Geosciences, University of Oslo.
- Engelhard, L., 1996, Determination of seismic-wave attenuation by complex trace analysis, *Geophys. J. Int.*, 125, 608-622.
- Ferreira, L. E. S., Porsani, M. J., da Silva, M. G. and Vasconcelos, G. L., 2013, Application of the empirical mode decomposition method to ground-roll noise attenuation in seismic data, *Revista Brasileira de Geofísica*, 31(4), 619-630.
- Huang, N. E., shen, Z., long, S. R., Wu, M. C., shih, H. H., Zheng, Q., yen, N. C., Tung, C. C. and Liu, H. H., 1998, The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis, *Proc. R. soc. lond*, 454, 903-995.
- Huang, N. E., wu, Z., long, S., Arnold, k. C., در طول مقاله به تفصیل بیان و گاه با برخی روش‌های دیگر مقایسه شد. انتظار می‌رود با شناسایی این روش استفاده از آن در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای بیشتر مورد توجه قرار گیرد.
- Chen, X. and Blank. K., 2009, On instantaneous frequency: advances in adaptive data analysis, 1(2), 177-229.
- Subrahmanyam, D. and Rao, P. H., 2008, Seismic attributes- a review: 7th International conference & exposition on petroleum geophysics, Hyderabad, P-398.
- Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G. and Flandrin, P., 2011, A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise: international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP), IEEE, abstracts, 4144-4147.
- Wu, Z. and Huang, N. E., 2009, Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method, proceeding of the world scientific publishing company, *Advances in adaptive data analysis*, 1(1), 1-41.