

مشخصه فازی موجک لرزه‌ای و اثر آن در روش MED

منا مدنی^۱ و محمدعلی ریاحی^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
^۲ دانشیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۴۱۰۶، پذیرش نهایی: ۸۵۶۲۸)

چکیده

استفاده از روش MED (Minimum Entropy Deconvolution) که در سال ۱۹۷۸ ویگینز آن را برای واهم‌آمیخت داده لرزه‌ای پیشنهاد کرد، به علت نداشتن بسیاری از فرضیات محدودکننده و داشتن الگوریتم ساده و تکرارپذیر، مورد توجه است. عملگر این روش فقط بر اساس سادگی خروجی که با نرم وریماکس تأیید می‌شود، به دست می‌آید. محققین از نرم‌هایی مشابه با نرم وریماکس در این روش استفاده کرده‌اند، که در این بین، نرم وریماکس به علت استفاده از ماتریس توپلیتس در معادله نهایی، محاسبات کم‌تر و بنابراین کاربرد بیشتری دارد. یکی از مهم‌ترین خصوصیات این روش، قرار ندادن هیچ‌گونه فرضی برای مشخصه فازی موجک لرزه‌ای است. در این مقاله، با طراحی فیلتر MED و برآوردهای موفق موجک لرزه‌ای با مشخصه فازی متفاوت این خصوصیت روی داده‌های مصنوعی، بررسی و سپس روی داده‌های واقعی نیز اعمال شده است.

واژه‌های کلیدی: مشخصه فازی، واهم‌آمیخت، حداقل انتروپی

۱ مقدمه

خروجی است که مطابق با الگوریتم ویگینز با نرم وریماکس سنجیده می‌شود. بنابراین، این روش، فرضی برای مشخصه فازی موجک لرزه‌ای قرار نمی‌دهد. به منظور بررسی این خصوصیت، در این تحقیق تعدادی ردلرزه برای چندین موجک لرزه‌ای با فازهای متفاوت به طور مصنوعی ساخته شد، فیلتر MED برای آنها به دست آمد و در نهایت موجک چشمه لرزه‌ای برآورد شد.

۲ نظریه

اگر سیگنال‌های ورودی، اندیس‌دار و به صورت زیر فرض شوند،

$$x_{ij} = \sum_{m=1}^M \omega_m e_{i,j-m+1} + n_{ij}, \quad i = 1, \dots, N_s, \quad j = 1, \dots, N_t \quad (1)$$

(N_s تعداد ردلرزه‌ها، N_t تعداد نمونه‌های زمانی در هر ردلرزه و n_{ij} نوفه افزاینده است)، خروجی‌های فیلتر

چنانچه ردلرزه مشاهده شده ($x(t)$)، به صورت هم‌آمیخت مدل زمین ($e(t)$) با موجک چشمه لرزه‌ای ($w(t)$) به اضافه نوفه تصادفی ($n(t)$)، در نظر گرفته شود:

$$x(t) = e(t) * w(t) + n(t) \quad (1)$$

هدف نهایی در واهم‌آمیخت، به دست آوردن $w(t)$ و $e(t)$ ، با وجود داشتن ردلرزه و اطلاعاتی از نوفه است. واضح است که این مسئله وارون‌سازی، مسئله‌ای غیر یکتا است، مگر آنکه اطلاعاتی از طبیعت $e(t)$ یا $w(t)$ در دسترس باشد. بیشتر روش‌های واهم‌آمیخت با صفر قرار دادن مقدار نوفه ($n(t) = 0$) و با قرار دادن فرض‌هایی برای مشخصه فازی موجک لرزه‌ای و یا برای توالی بازتاب‌پذیری زمین، این مسئله را حل می‌کنند. برای مثال در واهم‌آمیخت تابع ضربه، نوفه صفر و موجک حداقل فاز در نظر گرفته می‌شود.

اما در روش MED، تنها معیار انتخاب فیلتر، سادگی

اسپایک‌هایی با دامنه کوچک، بیشتر می‌شود. این پدیده مشخصه‌ای مطلوب در جهت حذف نوفه و محدودیتی برای تشخیص ضرایب بازتاب‌های کوچک است. چنانچه خواهیم داشت:

$$\frac{\partial y_{ij}}{\partial f_k} = x_{i,j-k}$$

$$\sum_i V_i u_i^{-1} \sum_j \sum_l f_l x_{i,j-l} x_{i,j-k} = \sum_i u_i^{-2} \sum_j y_{ij}^3 x_{i,j-k} \quad (5)$$

رابطه ۵ را می‌توان به صورت ماتریسی نوشت:

$$Rf = g \quad (6)$$

R ، ماتریس توپلیتس اتوکرولیشن سیگنال‌های ورودی و g ، بردار کراس کرولیشن مکعب خروجی‌های فیلتر با سیگنال‌های ورودی است. معادله ۶ غیر خطی است و روش ویگنیز آن را با استفاده از روشی تکرارپذیر حل می‌کند.

روش MED برای ساخت فیلتر، تنها از ردلرزه معلوم، استفاده می‌کند. در این روش، لازم است ابتدا ماتریس توپلیتس اتوکرولیشن ردلرزه ورودی (R) محاسبه شود، سپس فیلتر اولیه‌ای به شکل اسپایک در نظر گرفته می‌شود. این فیلتر به هر شکل دلخواهی می‌تواند باشد، اما بر اساس تجربه محققین، شکل اسپایکی، مطلوب‌ترین نتیجه را ایجاد خواهد کرد.

فیلتر اولیه بر ردلرزه ورودی اعمال شده و خروجی فیلتر (y) به دست می‌آید، از آنجا که فیلتر مفروض اولیه، ممکن است همان فیلتر مطلوب MED باشد، نرم وریماکس محاسبه می‌شود و مطلوب بودن یا نبودن فیلتر اولیه بررسی می‌شود. اگر مقدار نرم به حداکثر مطلوبی نرسیده باشد، این فیلتر اولیه برای محاسبه R و g به کار می‌رود و روند پیشین تکرار می‌شود. در نهایت، زمانی که نرم وریماکس به مقدار حداکثر مطلوبی می‌رسد، روند تکرار متوقف می‌شود و فیلتر MED به دست می‌آید.

MED (f_k) به صورت رابطه ۲ (y_{ij} تخمینی از e_{ij} است) و نرم وریماکس به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود،

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^{N_f} f_k x_{i,j-k} \quad (2)$$

$$V = \sum V_i, \quad V_i = \frac{\sum_j y_{ij}^4}{\left(\sum_j y_{ij}^2\right)^2} \quad (3)$$

در روش MED، راه حل مسئله واهم‌آمیخت براساس تعریف نرم وریماکس (رابطه ۳) است که وظیفه‌اش سنجش سادگی خروجی فیلتر است. برای یک ردلرزه منفرد که در همه زمان‌ها مقدار صفر و فقط در یک نقطه، اسپایکی غیر صفر دارد، مقدار نرم وریماکس برابر با یک است. هرچه مقادیر هم‌اندازه و غیر صفر در طول یک ردلرزه بیشتر شوند، مقدار V کوچک‌تر می‌شود، بنابراین هرچه ردلرزه نمایشی ساده‌تر داشته باشد، نرم آن به مقدار حداکثر (یک) نزدیک‌تر می‌شود، در عین حال، مقدار این نرم به مکان یا قطبش اسپایک‌ها وابسته نیست.

برای یافتن وریماکس حداکثر، از V نسبت به f_k مشتق گرفته و نتیجه برابر با صفر قرار داده می‌شود:

$$\frac{\partial V}{\partial f_k} = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial f_k} = \sum_i \frac{\partial V_i}{\partial f_k} = \sum_i \left[4V_i u_i^{-1} \sum_j y_{ij} \frac{\partial y_{ij}}{\partial f_k} - 4u_i^{-2} \sum_j y_{ij}^3 \frac{\partial y_{ij}}{\partial f_k} \right] \quad (4)$$

از رابطه اخیر که در آن $u_i = \sum_j y_{ij}^2$ واریانس ساده است، بر می‌آید که فیلتر MED به منظور تبدیل x_{ij} به y_{ij}^3 طراحی می‌شود، به همین دلیل است که ضمن فرایند MED، تعداد اسپایک‌هایی با دامنه بزرگ، نسبت به

مثال ۱

شکل ۱، موجک لرزه‌ای حداقل فاز با بسامد غالب ۱۵ هرتز (a-۱)، توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین (c-۱) و هم‌آمیخت آن دو (e-۱) را نشان می‌دهد. فیلتر MED برای این موجک حداقل فاز، مطابق با روش بازگشتی که در بالا توضیح داده شد، به دست آمده و موجک لرزه‌ای (b-۱) برآورد شده است. از مقایسه ردلرزه مصنوعی با ردلرزه برآورد شده (g-۱)، و اختلاف کم این دو (h-۱)، توانایی روش MED در برآورد موجک حداقل فاز، نتیجه گرفته شده است.

مثال ۳

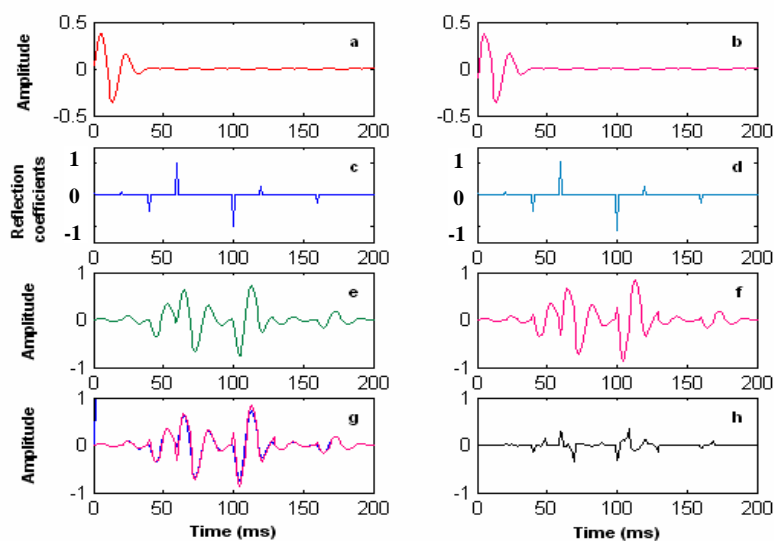
شکل ۳، موجک لرزه‌ای ریکر که دارای فاز صفر و بسامد غالب ۱۰۰ هرتز است (a-۳)، توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین (c-۳) و هم‌آمیخت آن دو (e-۳) را نشان می‌دهد. فیلتر MED برای این موجک به دست آورده شده و موجک لرزه‌ای (b-۳) برآورد شده است. از مقایسه ردلرزه مصنوعی با ردلرزه برآورد شده (g-۳) و اختلاف کم این دو (h-۳)، توانایی روش MED در برآورد موجک با فاز صفر، نتیجه گرفته شده است.

مثال ۲

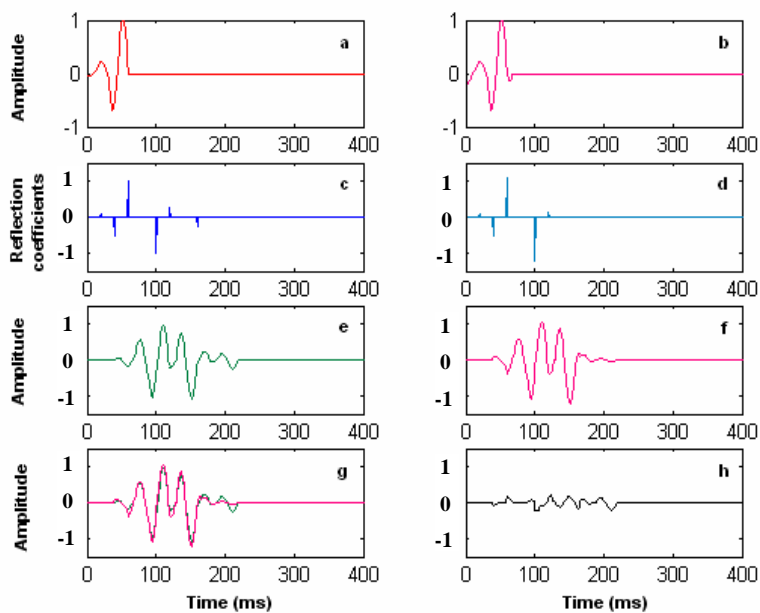
شکل ۲، موجک لرزه‌ای حداکثر فاز با بسامد غالب ۱۵ هرتز (a-۲)، توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین (c-۲) و هم‌آمیخت آن دو (e-۲) را نشان می‌دهد. فیلتر MED برای این موجک حداقل فاز به دست آمده و موجک لرزه‌ای (b-۲) برآورد شده است. از مقایسه ردلرزه مصنوعی با ردلرزه برآورد شده (g-۲)، و اختلاف کم این دو (h-۲)، توانایی روش MED در برآورد موجک حداکثر فاز، نتیجه گرفته شده است.

مثال ۴

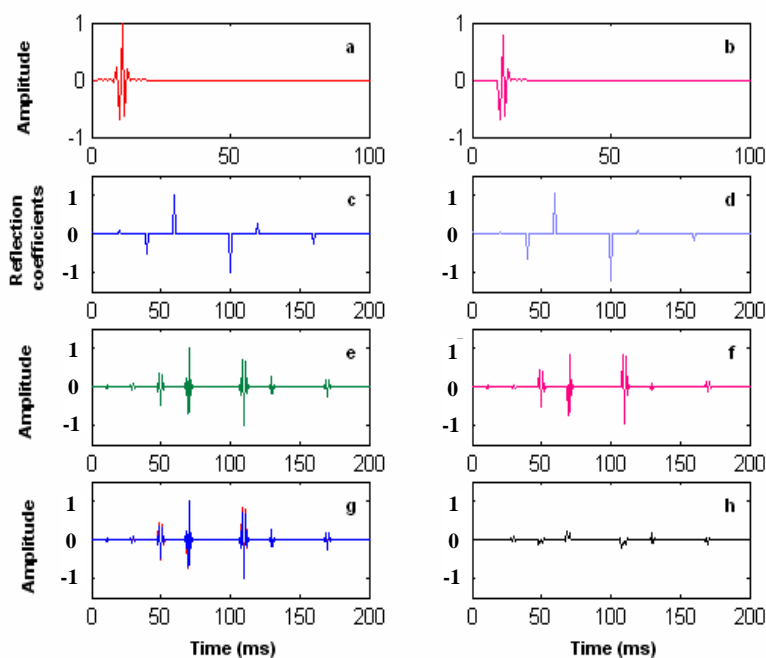
شکل ۴، موجک لرزه‌ای مختلط فاز با بسامد غالب ۲۰ هرتز (a-۴)، توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین (c-۴) و هم‌آمیخت آن دو (e-۴) را نشان می‌دهد. فیلتر MED برای این موجک به دست آمده و موجک لرزه‌ای (b-۴) برآورده شده است. از مقایسه ردلرزه مصنوعی با ردلرزه برآورده شده (g-۴)، و اختلاف کم این دو (h-۴)، توانایی روش MED در تخمین موجک با فاز صفر، نتیجه گرفته شده است.



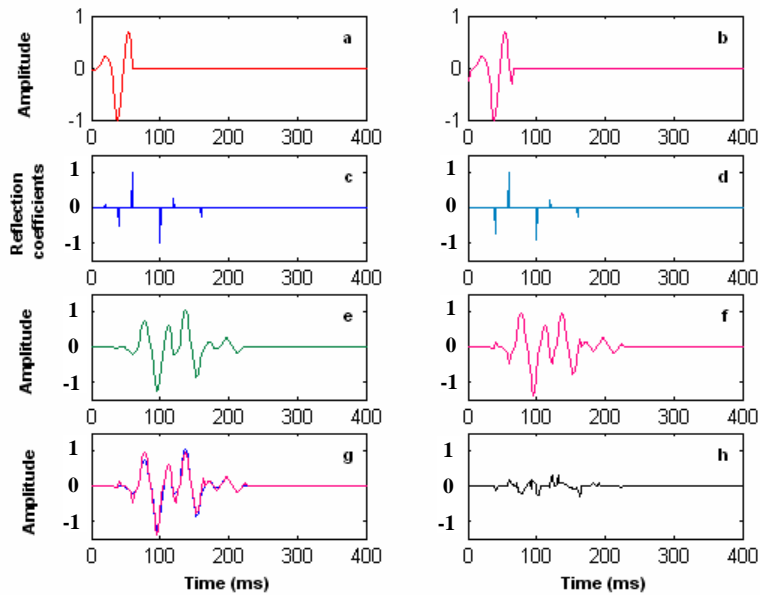
شکل ۱. (a) موجک مصنوعی حداقل فاز با بسامد غالب ۱۵ هرتز، (b) موجک برآورد شده، (c) توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورد شده، (e) ردلرزه مصنوعی، (f) ردلرزه برآورد شده، (g) برهم‌نهی ردلرزه مصنوعی و برآورد شده، (h) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورد شده.



شکل ۲. (a) موجک مصنوعی حداکثر فاز با بسامد غالب ۱۵ هرتز، (b) موجک برآورده شده، (c) توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورده شده، (e) ردلززه مصنوعی، (f) ردلززه برآورده شده، (g) برهم‌نهی ردلززه مصنوعی و برآورده شده، (h) اختلاف ردلززه مصنوعی و برآورده شده.



شکل ۳. (a) موجک مصنوعی ریکر با بسامد غالب ۱۰۰، (b) موجک برآورده شده، (c) توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورده شده، (e) ردلززه مصنوعی، (f) ردلززه برآورده شده، (g) برهم‌نهی ردلززه مصنوعی و برآورده شده، (h) اختلاف ردلززه مصنوعی و برآورده شده.



شکل ۴. (a) موجک مصنوعی مختلط فاز با بسامد غالب ۲۰ هرتز، (b) موجک برآورده شده، (c) توالی بازتاب‌پذیری مصنوعی زمین، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورده شده، (e) ردلرزه مصنوعی، (f) ردلرزه برآورده شده، (g) برهم‌نهی ردلرزه مصنوعی و برآورده شده، (h) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورده شده.

مقاله، موجک لرزه‌ای برای داده واقعی نیز برآورد شده است. به این منظور مقطع برانبارش نقطه عمقی مشترک (common depth point stacked section) نشان داده شده در شکل ۶، مورد بررسی قرار گرفته است.

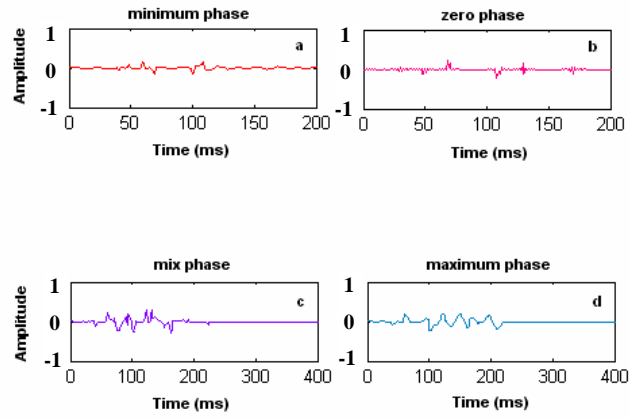
این مقطع شامل ۴۴ ردلرزه ۵۰۰ نمونه‌ای است که در آن، نرخ نمونه‌برداری ۵۰۰ میکروثانیه، فاصله گیرنده‌ها و نیز فاصله نقطه انفجار تا اولین گیرنده، پنج متر است.

الگوریتم MED با قرار دادن [۰، ۱، ۰، ۰، ...] به مثابه مقدار اولیه برای ردلرزه پانزدهم، فیلتر MED ($m = 40ms$) را به دست آورده، موجک چشمه لرزه‌ای (شکل ۷-c) را برآورد کرده است. شکل ۷-d، خروجی فیلتر واهم‌آمیخت حداقل آنتروپی را نشان می‌دهد که دارای حداقل آنتروپی و حداکثر سادگی است.

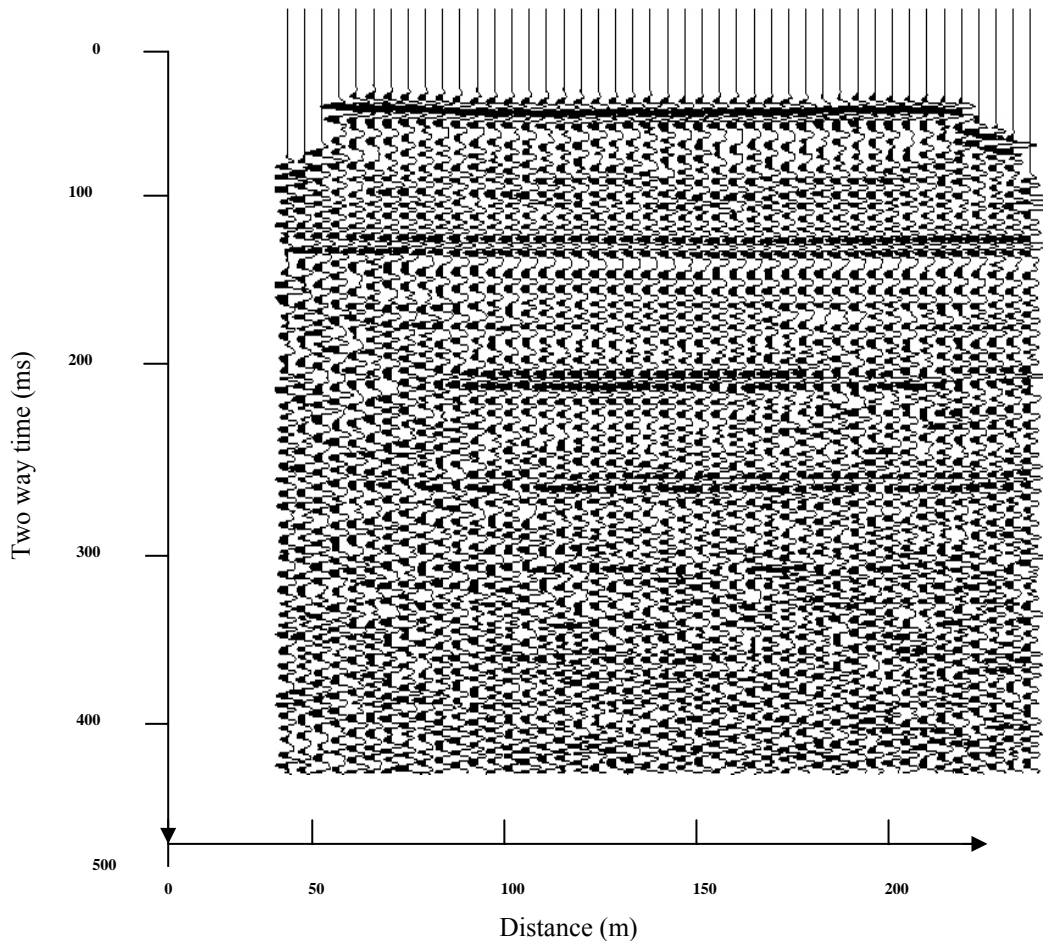
شکل ۵، نتایج برآورد موجک با روش MED را برای چهار موجک با فازهای حداقل، حداکثر، صفر و مختلط، نشان می‌دهد. هرچند روش MED، برای همه موجک‌های ارائه شده، نتیجه خوبی داشته، اما بهترین نتیجه، برای موجک با فاز صفر و نیز موجک حداقل فاز، به دست آمده است.

۳ اعمال فیلتر MED بر داده واقعی

طراحی فیلتر MED برای داده مصنوعی، نشان داد که واهم‌آمیخت حداقل آنتروپی، بدون قرار دادن فرضیات محدودکننده و با داشتن الگوریتمی ساده، روشی مناسب برای برآورد موجک چشمه لرزه‌ای و در نتیجه توالی بازتاب‌پذیری زمین است. لیکن، از آنجا که موفقیت یک روش به توانایی نظری و عملی آن وابسته است، در این



شکل ۵. (a) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورده شده برای موجک حداقل فاز، (b) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورده شده برای موجک با فاز صفر، (c) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورده شده برای موجک مختلط فاز، (d) اختلاف ردلرزه مصنوعی و برآورده شده برای موجک حداکثر فاز.



شکل ۶. مقطع برانبارش نقطه عمقی مشترک داده‌های واقعی.

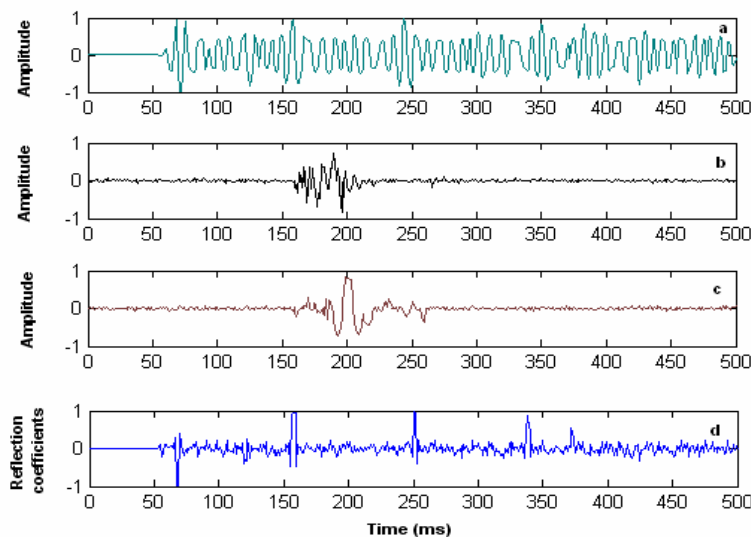
زیرا افزایش حد نرم وریماکس گاه دامنه برخی بازتاب‌های واقعی که دامنه بالایی ندارند را نیز تضعیف می‌کند.

۴ نتیجه‌گیری

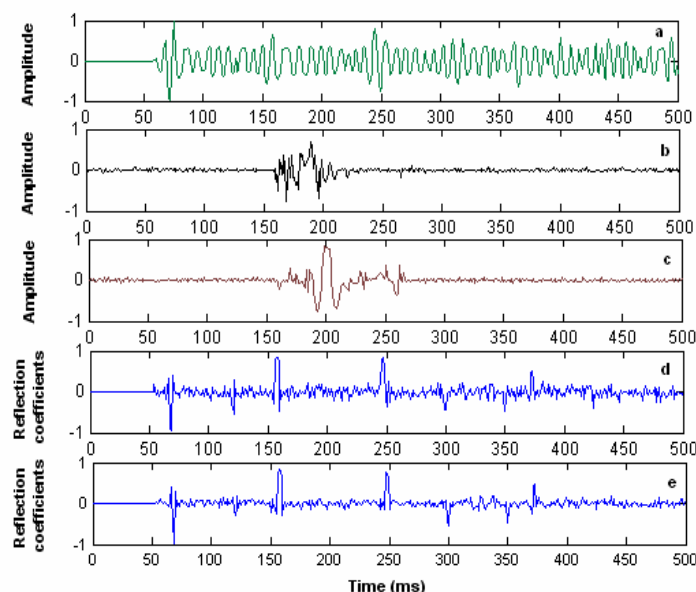
روشی که ویگینز در ۱۹۷۸ برای واهم‌آمیخت لرزه‌ای پیشنهاد کرد، فرض‌های محدودکننده روش‌های مرسوم را نداشت. واهم‌آمیخت لرزه‌ای در صورت نامعلوم بودن موجک لرزه‌ای و توالی بازتاب‌پذیری زمین، مسئله‌ای غیر یکتا خواهد بود مگر آنکه اطلاعاتی از طبیعت دو تابع مذکور در دسترس باشد. روش‌های متفاوت واهم‌آمیخت با در نظر گرفتن فرضیاتی برای این دو تابع، این مسئله غیر یکتایی را به نحو قابل قبولی حل می‌کنند. در این میان، واهم‌آمیخت حداقل آنتروپی، بدون قرار دادن پیش فرض و فقط با استفاده از ردلرزه معلوم، فیلتری خطی می‌یابد که برآورد خوبی از موجک لرزه‌ای به دست می‌دهد.

در ادامه، برآورد موجک لرزه‌ای با فیلتر MED، برای ردلرزه بیست و یکم از همان مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۶، صورت گرفته است. نتایج این تخمین در شکل ۸، مشاهده می‌شود. پس از مشاهده خروجی فیلتر MED (شکل ۸-d)، برای بررسی اثر افزایش حد نرم وریماکس در تشخیص بازتاب واقعی از غیرواقعی (حاصل از تداخل موجک‌های روی هم افتاده)، برای بار دوم با افزایش حد نرم وریماکس، فیلتر MED بر خروجی اعمال شده است (شکل ۸-e).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش حد نرم وریماکس (تعداد دفعات تکرار الگوریتم MED)، باعث کاهش دامنه در زمانی حدود ۱۲۰ میلی ثانیه شده است که می‌تواند اختطاری در غیرواقعی بودن این بازتاب باشد. بنابراین افزایش تعداد دفعات تکرار الگوریتم واهم‌آمیخت حداقل آنتروپی، می‌تواند عاملی در تشخیص واقعی یا غیرواقعی بودن بازتاب‌ها باشد، لیکن همچنان بهترین خروجی، حاصل از اولین اعمال فیلتر بر داده خواهد بود،



شکل ۷. برآورد موجک لرزه‌ای. (a) ردلرزه واقعی، (b) فیلتر MED، (c) موجک لرزه‌ای برآورد شده، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورد شده با فیلتر MED.



شکل ۸. برآورد موجک لرزه‌ای. (a) رد لرزه واقعی، (b) فیلتر MED، (c) موجک لرزه‌ای برآورد شده، (d) توالی بازتاب‌پذیری برآورد شده با فیلتر MED، (e) توالی بازتاب‌پذیری برآورد شده با فیلتر MED پس از افزایش حد نرم و ریماکس.

Cabrelli, C. A., 1984, Minimum entropy deconvolution and simplicity: A noniterative algorithm: *Geophysics*, **50**, 3, 394-413.

Oldenburg, D. W., Levy, S., and Whittall, K. P., 1981, Wavelet estimation and deconvolution: *Geophysics*, **46**, 11, 1528-1542.

Robinson, E. A., 1980, Physical application of stationary time-series, with special reference to digital data processing of seismic signals: Macmillan Publishing Co., Inc., New York.

Sacchi, M. D., Velis, D. R., Cminguez, A. H., 1994, Minimum entropy deconvolution with frequency domain constraints: *Geophysics*, **59**, 6, 938-945.

Wang, C., and Tang, J., 1991, The convergence of an MED iterative for the kurtosis norm: *Inverse probl.*, 139-148.

Wiggins, R. A., 1978, Minimum entropy deconvolution: *Geoexploration*, **16**, 21-35.

مهم‌ترین مزیت این روش نسبت به روش‌های مرسوم می‌ماند واهم‌آمیخت تابع ضربه و یا واهم‌آمیخت پیشگو، قرار ندادن هیچ‌گونه پیش‌فرض برای مشخصه فازی موجک لرزه‌ای است، به‌طوری‌که می‌تواند موجک لرزه‌ای با هر مشخصه فازی را به خوبی برآورد کند. از محدودیت‌های این روش می‌توان مواردی را به شرح زیر ذکر کرد: این روش نسبت به انتخاب مدل اولیه و نوع داده‌های ورودی مانند اسپایک‌های متوالی حساس است، برآورد موجک با استفاده از روش یادشده برای حالتی که نسبت سیگنال به نوفه چهار باشد، همراه با خطای زیاد خواهد بود. این روش برای حالتی که موجک مختلط فاز یا حداکثر فاز باشد نتیجه مطلوبی به دست نمی‌دهد.

منابع

Boadu, F. K., and Brown, R. J., 1997, Constrained minimum-entropy deconvolution: *Can. J. Explor. Geophys.* **33**, 1 and 2, 32-45.