JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۳، شماره ۲، ۱۳۹۶، صفحات ۱۶۶–۱۵۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2016.740

واهمامیخت ناپایا با استفاده از بهینه‌سازی تصادفی تبلور شبیه‌سازی شده

اکبر حیدری[۱]، تکتم زند[۱*] و علی غلامی[۲]

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: **toktam.zand@ut.ac.ir**

واژگان کلیدی

واهمامیخت ناپایا
سری ضرایب بازتاب
فاکتور کیفیت لرزه‌ای
فیلتر میرایی
الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده

چکیده

واهمامیخت یکی از مراحل مهم پردازش سیگنال‌های لرزه‌ای برای به دست آوردن تصاویر با تفکیک‌پذیری بالا از زیر سطح زمین از جمله تصاویر مخازن هیدروکربن است. در این مقاله فرآیند واهمامیخت ناپایا به منظور تخمین دامنه و زمان ضرایب غیر صفر سری بازتاب و همچنین تخمین فاکتور کیفیت لایه‌ها با فرض وجود محیط میرا کننده برای انتشار موجک چشمه با استفاده از روشی آماری انجام شده است. بازیابی محل دقیق بازتاب‌ها و حذف اثر میرایی زمین با استفاده از الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده صورت گرفته و فاکتور کیفیت برای هر لایه تخمین زده می‌شود. همچنین دامنه سری ضرایب بازتاب نیز با روش کمترین مربعات به دقت به دست می‌آید. در روش پیشنهادی، هر سه پارامتر دامنه، زمان ضرایب و فاکتور کیفیت مربوط به هر لایه به صورت هم‌زمان تخمین زده می‌شود که می‌توان آن را مزیتی نسبت به سایر روش‌ها بیان کرد. از الگوریتم تبلور شبیه‌سازی‌شده که الگوریتمی آماری و بر پایه‌ی تکرار است؛ برای حل مسئله‌ی مورد نظر استفاده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این الگوریتم بر داده‌های مصنوعی و میدانی، دقت عملکرد آن را به خوبی نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

هدف مطالعات لرزه‌ای به دست آوردن تصویری با تفکیک‌پذیری بالا از مقاطع زیرسطحی است. تفکیک‌پذیری به معنای توانایی تشخیص بین دو رخداد بر روی رکورد لرزه‌ای است؛ که در زیر سطح زمین بسیار به هم نزدیک هستند. بر اساس این‌که تفکیک‌پذیری رخدادهای زیرسطحی در چه جهتی مورد بررسی قرار گیرند، دو نوع تفکیک‌پذیری تعریف می‌شود: تفکیک‌پذیری افقی و تفکیک‌پذیری قائم (Sheriff and Geldart, 1983). هدف اصلی این مقاله بررسی تفکیک‌پذیری قائم یعنی توانایی تشخیص و تفکیک لایه‌ی نازک است؛ که بهبود آن یکی از مسائل اصلی و بحث‌برانگیز در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای به شمار می‌رود (Margrave et al., 2011; Golami and Sacchi, 2012). تفکیک‌پذیری قائم تصاویر لرزه‌ای عمدتاً تابعی از محتوای فرکانسی میدان موج دریافتی است؛ به‌گونه‌ای که هرچه باند فرکانسی موج دریافتی بیشتر باشد تفکیک‌پذیری قائم بیشتر است. در عمل این کمیت تحت تأثیر فاکتورهایی نظیر الگوریتم‌های پردازش و تصویرسازی، مشکلات ایجاد شده در تولید امواج با باند فرکانسی بالا و اثرات فیلتر زمین قرار می‌گیرد. ردلرزه دریافت شده توسط گیرنده را می‌توان حاصل همامیخت موجک چشمه‌ی لرزه‌ای و پاسخ زمین که معمولاً از آن با سری ضرایب بازتاب یاد می‌شود در نظر گرفت. در عمل پاسخ ضربه زمین تفاوت قابل‌توجهی با سری ضرایب بازتاب زمین دارد؛ که این امر به دلیل اثر فیلتر میرایی زمین است که باعث کاهش انرژی موج منتشر شده با زمان و مسافت طی شده می‌شود (Wang, 2008)؛ به عبارت دیگر ماهیت ناهمسانگردی و ناهمگنی زمین باعث کاهش انرژی و تغییر در باند فرکانسی موجک منتشر شده در زمین می‌شود؛ که از این فرآیند به عنوان میرایی زمین یاد می‌شود. همچنین به دلیل خاصیت پاشندگی زمین، موجک منتشر شده تغییر شکل می‌یابد. اثر میرایی و پاشش دو خاصیت لاینفک زمین می‌باشند (Aki and Richards, 2002). تأثیر موجک، میرایی و پاشندگی زمین باعث کاهش باند فرکانسی موجک لرزه‌ای و در نتیجه کاهش تفکیک‌پذیری تصاویر به دست آمده از لایه‌های زیرسطحی می‌شود. این امر به شدت بر تفسیر تصاویر به دست آمده از مقاطع زیرسطحی مؤثر بوده و اهمیت آن در صنعت اکتشاف نفت و گاز قابل‌توجه است. واهمامیخت ناپایا برای برداشتن اثر موجک و همچنین میرایی زمین از ردلرزه دریافتی با هدف افزایش باند فرکانسی، افزایش تفکیک‌پذیری تصاویر دریافتی و در نتیجه آن کاهش ریسک حاصل از اکتشافات مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های زیادی برای برداشتن اثر میرایی در حین واهمامیخت انجام شده است. احدی و پورحسین (۱۳۹۰) عملگر واهمامیخت گابور را برای واهمامیخت ناپایای امواج درون‌چاهی طراحی کردند. جهدی و سیاهکوهی (۱۳۷۸) عملگر واهمامیخت گابور را به صورت متغیر با زمان برای واهمامیخت ناپایا بکار بردند. Clarke(1968) مدل همامیخت ناپایا را پیشنهاد داد و با استفاده از فیلتر ونر (wiener filtering) فیلتری بهینه طراحی کرد و واهمامیخت ناپایا را مستقیماً در حوزه زمان انجام داد. برخی از روش‌ها به دنبال تخمین و حذف اثر جذب در یک مرحله جداگانه هستند. از آنجایی که عکس جذب به صورت نمایی نسبت به زمان و فرکانس رشد می‌کند، این فیلترها ناپایدار است. روش‌های متعددی برای حل این مسئله ارائه شده است (Bichel and Natarajan, 1985، Hargreaves and calvert, 1991، Wang, 2008 و Zhang and Ulrych, 2007).

Margrave et al. (2011) روشی ساده برای انجام مستقیم واهمامیخت ناپایا پیشنهاد داد. بر این اساس اگر ردلرزه ناپایا به ردلرزه‌های کوچک تقسیم شود تقریباً هر کدام از آن‌ها را می‌توان پایا در نظر گرفت و به روشی شبیه روش Robinson and Treitel (1967) موجک مناسب برای هر کدام از آن‌ها را استخراج کرده و با وارون‌سازی، اثر آن را حذف کرد و سری ضرایب بازتاب مربوط به آن بخش را استخراج نمود. در نهایت تصویر کردن آن‌ها باعث ایجاد تقریبی از سری ضرایب بازتاب زمین می‌شود. روش Margrave et al. (2011) که به واهمامیخت گابور (Gabor deconvolution) مشهور است، به دلیل تقریب‌های استفاده شده ناپایدار است و حتی زمانی که نوفه وجود نداشته باشد و اثر چشمه و جذب هم معلوم باشند به دلیل خطاهای سیستماتیک که از تقریب ناشی شده‌اند؛ نتیجه واهمامیخت گابور به سری ضرایب بازتاب اولیه منجر نمی‌شود.

در فرآیند واهمامیخت ناپایا با فرض لایه‌ای بودن زمین، به دست آوردن محل دقیق بازتابنده‌ها و همچنین دامنه آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به محدود بودن باند موجک، بی‌شمار جواب برای حل این مسئله وجود دارد و با توجه به عدم یکتایی سری ضرایب بازتاب، استفاده از اطلاعات اولیه با هدف به دست آوردن جوابی که بیشترین برازش با داده اولیه و سازگاری با قیود بیان شده را داشته باشد، در حل مسئله ضروری است. در اینجا هدف به دست آوردن دامنه، مکان زمانی دقیق بازتاب‌ها و تخمین فاکتور کیفیت برای هر لایه است؛ به گونه‌ای که سری ضرایب بازتاب به دست آمده پس از همامیخت با موجک چشمه و اعمال اثر جذب حاصل بیشترین برازش با ردلرزه اولیه و سازگاری با قیود مسئله را داشته باشد. مسئله‌ی بیان شده یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی است؛ که برای حل آن روش‌های زیادی ارائه شده است. روش به کار برده شده در این مقاله الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده است (Kirkpatrick et al., 1983; Laarhoven et al., 1987).

Velis (2008) با استفاده از این الگوریتم به حل مسئله واهمامیخت پایا بدون در نظر گرفتن اثر جذب پرداخته است. در این مقاله الگوریتم مذکور توسعه یافته و برای حل مسئله واهمامیخت ناپایا بکار برده می‌شود. واهمامیخت ناپایا یک مسئله‌ی بسیار بد وضع بوده که تا به حال کار زیادی بر روی آن انجام نشده است.

الگوریتم ارائه شده در این مقاله به نحوی به شکل کور با مسئله‌ی عدم دانش ما از میدان جذب زمین برخورد می‌کند. لذا واهمامیخت و تخمین میدان جذب زمین به شکل هم‌زمان به شکل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی انجام می‌گیرد. در ادامه ابتدا به معرفی الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده پرداخته و سپس تئوری مسئله پیشِ رو بیان می‌شود. در انتها عملکرد الگوریتم بر داده مصنوعی و میدانی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی الگوریتم‌های زیادی پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها می‌توان به الگوریتم hill-climbing که توسط Cohen et al., (1994) معرفی شد، الگوریتم ژنتیک (Ingber and Rosenm, 1992) و الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده (Kirkpatrick et al., 1983) اشاره کرد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دنبال بهترین جواب از دید کمینه یا بیشینه کردن تابع هزینه ترتیب داده شده، هستند و ابتدا با انتخاب یک جواب تصادفی، به جستجوی جوابی در اطراف آن جواب می‌پردازند. اگر جوابی که در همسایگی حدس اولیه هست بهتر از جواب اولیه باشد، به آن جواب نقل مکان کرده و در غیر این صورت همان جواب اولیه را نگه می‌دارد. اساس این روش‌ها کاملاً منطقی است؛ اما گاهی ممکن است که الگوریتم در یک جواب کمتر از حد مطلوب به دام بیافتد.

مزیت این روش نسبت به سایر روش‌های بر مبنای گرادیان (Duchi et al., 2011) این است که در طی فرآیند بهینه‌سازی، جواب در کمینه‌ی محلی به دام نمی‌افتد (Rutenbar, 1989). در واقع الگوریتم پیشنهادی، با اضافه کردن مقادیر تصادفی به فضای جواب، از به دام افتادن در اکسترمم‌های محلی فرار می‌کند؛ به عبارت دیگر با نزدیک شدن الگوریتم به جواب اصلی، اضافه کردن مقادیر تصادفی به همسایگی جواب و گاهی ترجیح تصادفی به انتخاب جواب غلط باعث می‌شود که الگوریتم در اکسترمم محلی به دام نیفتاده و از آن‌ها خارج شده و به سمت جواب اصلی حرکت کند. مراحل الگوریتم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- تولید یک جواب تصادفی که انتخاب این جواب بسته به نوع مسئله کاملاً اختیاری است و الزاماً نباید بهترین حدس باشد.

۲- تعریف یک تابع هزینه مناسب که می‌تواند ساده و یا پیچیده باشد. تعریف تابع هزینه قسمت دشوار الگوریتم است. در این مرحله باید جواب را در تابع هزینه قرار داد و مقدار آن را به دست آورد.

۳- در یک همسایگی تعریف شده، مجموعه‌ای از جواب انتخاب شده، مجدداً در تابع هزینه قرار گرفته و مقادیر آن محاسبه می‌شود.

۴- مقایسه‌ی مقادیر تابع هزینه؛ در صورتی که مقدار تابع هزینه برای جواب جدید کمتر از مقدار آن برای جواب قدیمی باشد، این بدان معنی است که الگوریتم به جواب بهینه نزدیک می‌شود و بنابراین جواب جدید جایگزین جواب قدیم در تکرارهای بعدی الگوریتم می‌شود.

وجه تمایز الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های نام برده شده زمانی مشخص می‌شود که مقدار تابع هزینه برای جواب جدید بیشتر از جواب قدیم باشد. این بدان معناست که جواب جدید نادرست است. اغلب الگوریتم‌ها از رفتن به سمت جواب‌های نادرست اجتناب می‌کنند و پای فشاری آن‌ها در این امر ممکن است سبب به دام افتادن در کمینه یا بیشینه‌ی محلی شود. برخلاف سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم SA ترجیح می‌دهد که گاهی به سمت جواب غلط هم پیش برود و این کار را با سنجیدن میزان احتمال رسیدن به جواب درست انجام می‌دهد. تصمیم این الگوریتم برای انتخاب جواب جدید، با استفاده از یک تابع توزیع احتمال که برحسب مقادیر هزینه برای جواب جدید و قدیم تعریف می‌شود، است. در واقع مقدار احتمال را با یک عدد تصادفی بین صفر و یک مقایسه کرده و در صورت بزرگ‌تر بودن احتمال از این عدد، جواب جدید را به عنوان حدسی برای رسیدن به کمینه‌ی جهانی برای تکرارهای بعدی الگوریتم انتخاب می‌کند.

مزیت دیگر الگوریتم تخمین عدم قطعیت مسئله وارون با اجرای متعدد الگوریتم است. این امر این امکان را می‌دهد که بتوان به صورت آماری فضای مدل را جستجو کرده و مجموعه‌ای از جواب‌های تُنُک که هم داده را برازش دهد و هم قیود در آن صادق باشند، به دست آورد (Laarhoven et al., 1987).

۲- تعریف مسئله

اگر $w \in R^N$ موجک چشمه باشد می‌توان ردلرزه‌ی دریافت شده را به صورت رابطه‌ی زیر که هماهمیخت موجک چشمه و سری ضرایب بازتاب زمین است مدل‌سازی کرد (Gholami, 2015):

$$y_n = \sum_{\tilde{n}=0}^{N-1} x_{\tilde{n}} w_{n-\tilde{n}} + e_n, n = 0, \cdots, N-1 \qquad (۱)$$

صورت ماتریسی این رابطه به صورت زیر است:

$$Wx = y \qquad (۲)$$

e نوفه تصادفی و W ماتریس توئپلیتز ساخته شده از موجک چشمه و x پاسخ ضربه زمین است. اگر پالس تولید شده توسط چشمه یک تابع دلتا در نظر گرفته شود؛ تمام مؤلفه‌های فرکانسی آن به هنگام عبور از زمین دچار تقدم و تأخر می‌شوند. زمین در حالت ایده آل دارای تابع فاز خطی است، به این معنا که پاسخ فازی یک تابع خطی از فرکانس است؛ که بدون ایجاد تغییر شکل موجک منجر به تغییر مکان پالس و تغییر دامنه در حین انتشار می‌شود. در این حالت می‌توان x را به صورت اسپایک‌های وزن‌دار نوشت:

$$x_{\tilde{n}} = \sum_{n=0}^{N-1} r_n \delta_{\tilde{n}-n} \qquad (۳)$$

در این رابطه اگر $\tilde{n} = n$ آنگاه $\delta_{\tilde{n}-n} = 1$ و اگر $\tilde{n} \neq n$

آنگاه $\delta_{n-\tilde{n}}=0$ که تعریف تابع دلتای دیراک است. در این رابطه r_n دامنه‌ی موج بازتاب شده از بازتابنده پس از انتشار از چشمه است؛ که زمان رفت و برگشت آن n است. بردار r هدف نهایی واهمامیخت موجک چشمه است؛ زیرا از آن به عنوان سری ضرایب بازتاب زمین نامبرده می‌شود و برای تفسیر ناحیه‌ی مورد بررسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معادله‌ی (۳) به راحتی می‌توان به این نکته پی برد که برای زمین ایده آل و بدون میرایی، $x=r$ است و r به راحتی و با روش واهمامیخت پایا قابل محاسبه است. در حقیقت زمین خاصیت میرا کننده دارد؛ بنابراین موج منتشر شونده در محیط تحت تأثیر مکانیسم‌های جذب و پاشش قرار می‌گیرد. قضیه‌ی Q ثابت (Aki and Richards, 2002) اثر مکانیسم جذب بر تابع دلتای منتشر شونده با زمان n را تعریف می‌کند. اگر بازه‌ی فرکانسی به صورت زیر تعریف شود:

$$f_k=\left[\left(\frac{k}{n}-\frac{1}{2}\right)\mathrm{mod}1\right]-\frac{1}{2} \quad \text{for} \quad k=0,\cdots,N-1 \tag{۴}$$

تابع دلتای منتشر شونده در محیط، در معادله‌ی دیفرانسیلی خطی همگن زیر که در حوزه‌ی فرکانس نوشته می‌شود صدق می‌کند (Gholami, 2015):

$$\hat{\delta}_k^{(n)}=z_k\delta_k^{(n-1)} \tag{۵}$$

در این رابطه $\delta^{(n)}$ تابع دلتا پس از انتشار در زمان n است و $\hat{\delta}_k^{(0)}=1$. همچنین تابع z_k به صورت زیر تعریف می‌شود (Gholami, 2015):

$$z_k=\exp\left(-\frac{\pi f'}{Q}-\frac{i\,2\pi k}{N}\right) \tag{۶}$$

که در آن $f_k'=|f_k|-i\varphi_k$ و φ_k تأخیر فاز پالس میرا شده را نشان می‌دهد. برای برقراری یک سری قیود فیزیکی مانند علیت بر موج منتشر شده، وجود طیف فاز مناسب نیاز است. این قیود نشان می‌دهند که تابع تأخیر فازی موج منتشر شونده در محیط میرا شونده رابطه‌ی خطی با فرکانس ندارد و پالس منتشر شونده تحت تأثیر پدیده‌ی پاشش قرار می‌گیرد. مدل‌های مختلفی برای اثر میرایی و پاشش زمین تعریف شده است که با توجه به آن φ_k تعریف می‌شود. با توجه به معادلات ۳ و ۴ می‌توان به این نکته پی برد که شکل و محتوای فرکانسی پالس منتشر شونده در زمین بر اثر زمان و فاکتور کیفیت هر لایه تغییر می‌یابد. اگر ماتریس $\Delta_{t,Q}$ به عنوان عملگر فیلتر میرایی زمین که ستون‌های آن عملگر جذب به ازای زمان و مقادیر مختلف فاکتور کیفیت می‌باشند، در نظر گرفته شود، رابطه‌ی ۱ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$W\Delta_{t,Q}r+e=y \tag{۷}$$

در این رابطه اگر $A_{N\times M}=W\Delta_{t,Q}$ باشد، با N رابطه‌ی غیرخطی و $2M$ مجهول روبرو هستیم. برای حل این مسئله می‌توان مربع خطای بین داده‌ی واقعی و داده‌ی تخمین زده شده را کمینه کرد؛ که برای این منظور تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_a=\|Ar-y\|_2^2 \tag{۸}$$

با مشتق‌گیری از این رابطه نسبت به r می‌توان دامنه‌ی بازتاب را محاسبه نمود:

$$\frac{\partial J_a}{\partial r}=2A^T\left(Ar-y\right)=0 \tag{۹}$$

بنابراین داریم:

$$r=\left(A^TA\right)^{-1}A^Ty \tag{۱۰}$$

قیود مربوط به امپدانس روش پیشنهادی برای حل مسئله پیشِ رو این امکان را می‌دهد که قیود مربوط به امپدانس به راحتی وارد مسئله‌ی بهینه‌سازی شود؛ که این مسئله از عدم یکتایی و عدم قطعیت مدل به دست آمده می‌کاهد (Velis, 2008)؛ به عبارت دیگر با داشتن اطلاعات زمین‌شناسی می‌توان قیودی را به مسئله اضافه کرد. اگر فرض شود مجموعه‌ای به تعداد K امپدانس I_i در زمان‌های T_i معلوم باشد، از آن می‌توان به صورت قید در فرمول‌بندی مسئله‌ی واهمامیخت استفاده کرد. رابطه‌ی بین امپدانس و سری ضرایب بازتاب به صورت زیر است:

$$x_t=\frac{I_t-I_{t-1}}{I_t-I_{t+1}}\approx\frac{\Delta I_t}{2I_t}=\frac{1}{2}\Delta\log I_t \tag{۱۱}$$

از این رابطه می‌توان به رابطه‌ی زیر رسید:

$$\sum_{j=1}^{T_i}x_j\approx\frac{1}{2}\log\frac{I_i}{I_0}=\xi_i,\ i=1,\cdots,K \tag{۱۲}$$

در این رابطه I_0 مقدار امپدانس در سطح زمین و I_i مقدار امپدانس در زمان T_i است. با تخمین زمان شیفت τ_j که از الگوریتم به دست می‌آید، می‌توان نوشت:

$$\sum_{j=1}^{M}x_ju_{T_i-\tau_j}=\xi_i,\ i=1,\cdots,K \tag{۱۳}$$

در این رابطه u_t تابع پله است. شکل ماتریسی این رابطه به صورت زیر است:

$$Cx=\xi \tag{۱۴}$$

در این رابطه $C_{K\times M}$ ماتریس مولد نگار امپدانس و $\xi_{K\times 1}$ بردار امپدانس است. در نهایت تابع هزینه مسئله بهینه‌سازی مورد نظر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J = \|Ax - y\|_2^2 + \mu\|Cx - \xi\|_2^2 + \beta\|x\|_2^2 \qquad (۱۵)$$

در این رابطه جمله‌ی اول اختلاف سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده با داده‌ی لرزه‌ای را محاسبه می‌کند. جمله‌ی دوم اطلاعات اولیه از نگار امپدانس را به عنوان قید درگیر می‌کند و جمله‌ی آخر شرط پیروی دامنه‌های تخمین زده‌شده از توزیع گوسی را اعمال می‌کند. در این رابطه μ و β پارامتر منظم‌سازی می‌باشند که متناسب با هر مسئله تعیین می‌شوند.

۳- روش حل مسئله

با مشتق‌گیری از این تابع، ضرایب بازتاب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x = (F + \beta I)^{-1}(A^T y + \mu C^T \xi) \qquad (۱۶)$$

در این رابطه $F = A^T A + \mu C^T C$ و I ماتریس همانی است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد اهمیت حضور نگار امپدانس برای تعیین تعداد بازتابنده در هر ردلرزه است؛ به عبارت دیگر از روی نگار امپدانس پارامتر M تعیین می‌شود. همچنین دقت در تعیین پارامتر منظم‌سازی در عملکرد الگوریتم برای به دست آوردن ضرایب بازتاب صحیح بسیار با اهمیت است. آنچه در این روابط برای ما معلوم است نگار امپدانس و داده‌ی لرزه‌ای است و مجهولات مسئله، دامنه‌ی بازتاب و فاکتور کیفیت است. تابع هزینه که در رابطه‌ی ۱۶ بیان شده است با داشتن محل زمانی بازتابنده‌ها دامنه‌ی آن‌ها را تخمین می‌زند از این‌رو الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده برای یافتن هم‌زمان محل بازتابنده‌ها مورد استفاده قرار گرفته شده است. مراحل الگوریتم برای مسئله‌ی واهمامیخت به منظور تخمین محل بازتابنده‌ها و دامنه‌ی بازتاب به صورت زیر است:

ابتدا پارامترهای منظم‌سازی تعیین شده و همچنین تعداد بازتابنده‌ها یعنی M با توجه به اطلاعات نگار امپدانس تعیین می‌شود. تابع توزیع احتمال که در الگوریتم برای بررسی درستی جواب به دست آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد تابعی از متغیری است که در منابع از آن به عنوان دما یاد می‌کنند. این متغیر در ابتدای الگوریتم مقداردهی می‌شود.

تعیین یک مقدار اولیه برای τ (محل بازتابنده‌ها). این مقادیر به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شود.

حلقه‌ی تکرار الگوریتم با محاسبه‌ی مقادیر A, C, F, x, J برای زمان‌های انتخاب شده τ_{old} آغاز می‌شود.

به زمان‌های انتخاب شده مقادیر کوچک و تصادفی اضافه می‌شود $\tau_{new}^j = \tau_{old}^j + \Delta\tau^j$.

مقادیر A, C, F, x, J برای τ_{new} محاسبه می‌شود.

در این مرحله با محاسبه‌ی تابع هزینه برای مقادیر قدیم و جدید زمان بازتابنده‌ها اگر $J_{new} < J_{old}$ آنگاه زمان‌های جدید جایگزین زمان‌های قدیم در الگوریتم شده و اگر $J_{new} > J_{old}$ آنگاه باید به بررسی تابع توزیع احتمال در الگوریتم پرداخته شود.

در حالی که σ واریانس نوفه باشد اگر $\|Ax - y\|_2^2 < \sigma$ الگوریتم متوقف شده، ولی در غیر این صورت مراحل ۳ تا ۶ تکرار می‌شوند. مراحل ۳ تا ۷ چندین مرتبه تکرار می‌شود.

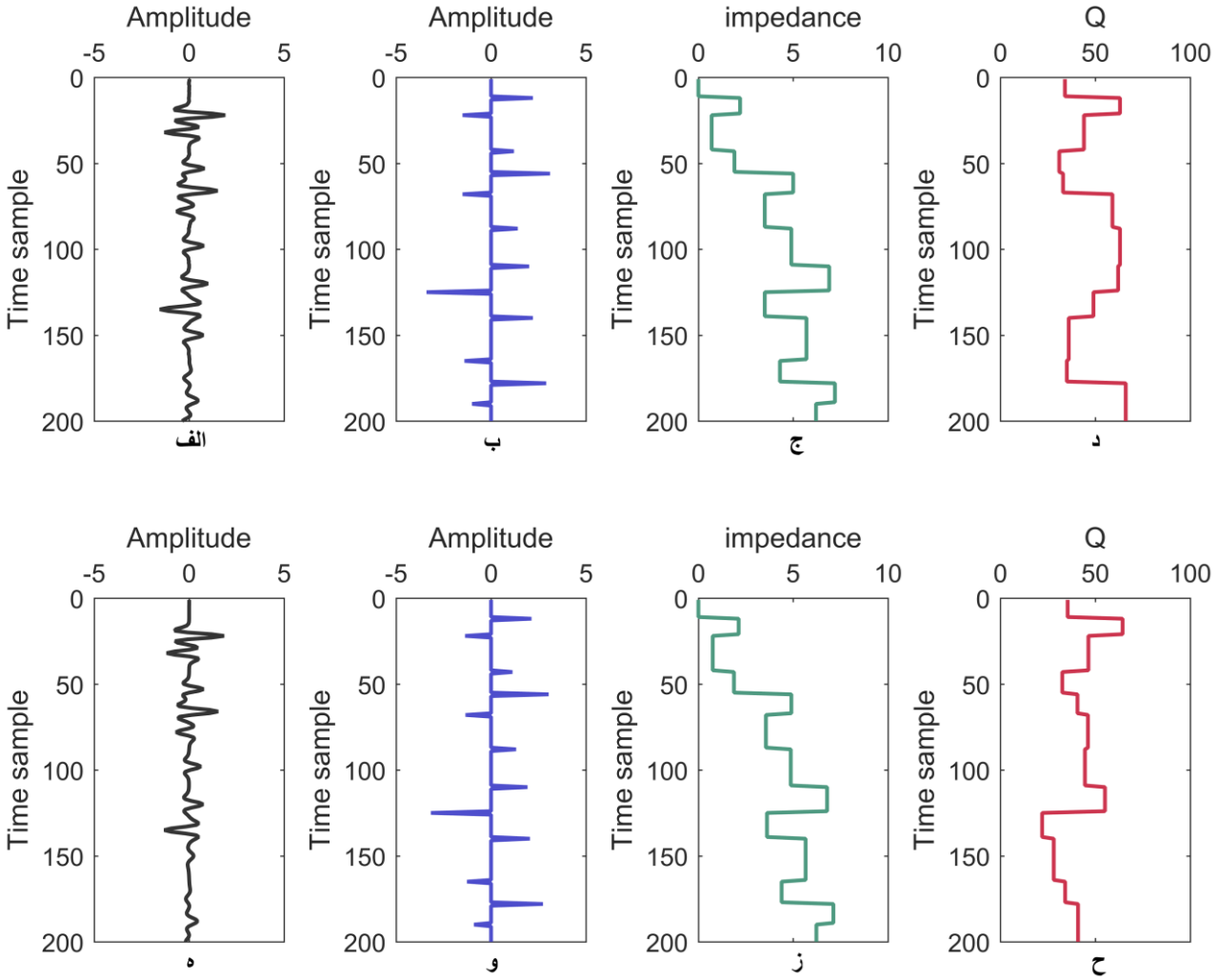
در این مرحله پارامتر دما کاهش یافته و مجدداً مرحله‌ی ۳ آغاز می‌شود. این مراحل تا حدی تکرار می‌شود که یا شرط بیان شده در مرحله‌ی ۷ برقرار باشد و یا پارامتر دما تا حدی که توسط کاربر تعیین شده است کاهش یابد.

۴- مثال‌های عددی

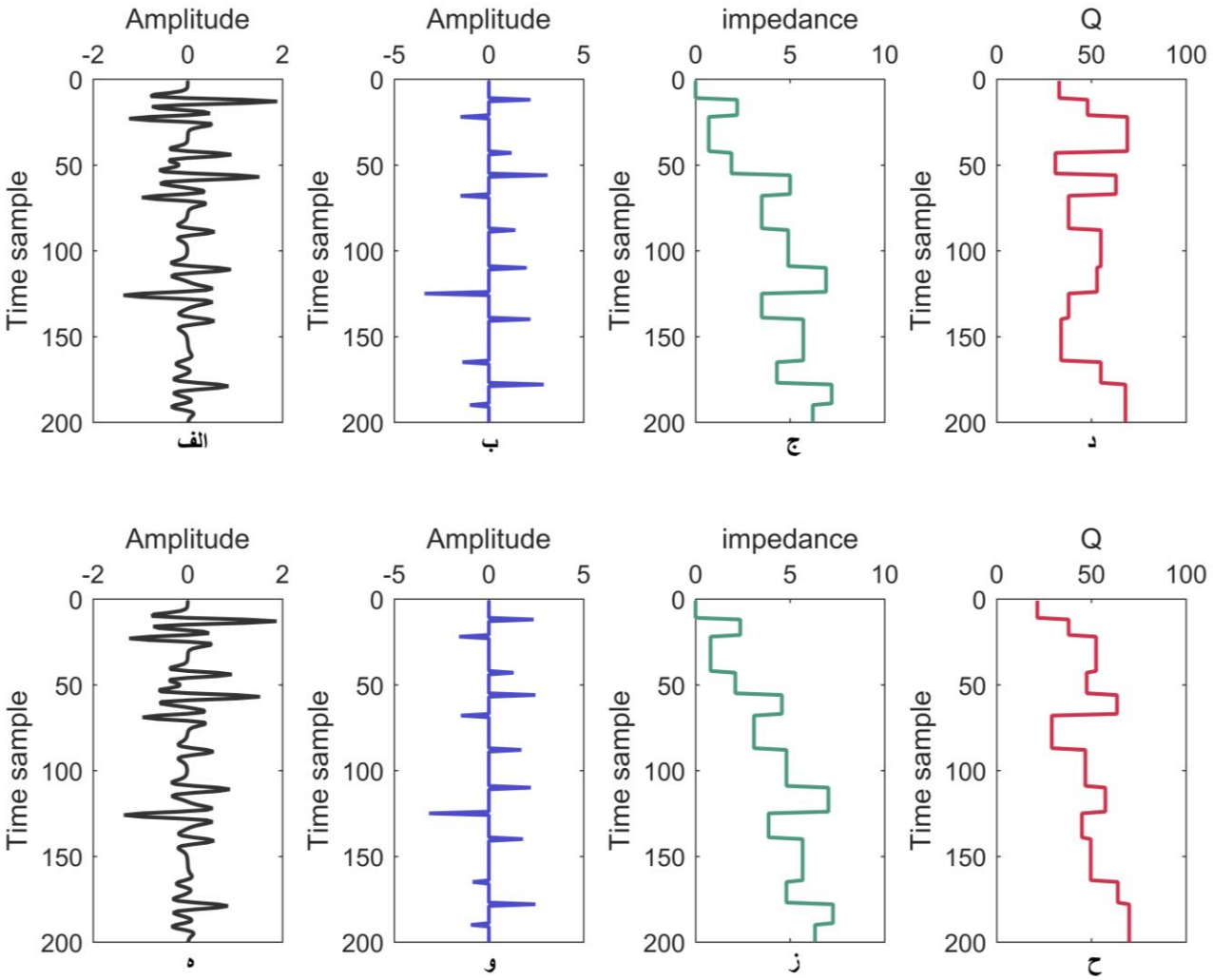
الگوریتم پیشنهادی برای واهمامیخت داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱-الف ردلرزه‌ی مصنوعی را نشان می‌دهد که حاصل از همامیخت موجک ریکر با فاز مرکب فرکانس غالب ۳۰ هرتز و سری ضرایب بازتاب شبیه‌سازی شده است که در شکل ۱-ب نشان داده شده است. همچنین نوفه با واریانس ۰/۰۰۱ به ردلرزه اضافه شده است. همان‌طور که پیش از این گفته شد، یکی از قیود وارد شده به مسئله، نگار امپدانس است که در تابع هزینه ظاهر می‌شود. شکل ۱-ج مقادیر نگار امپدانس مفروض را نشان می‌دهد. شکل ۱-د مقادیر فاکتور کیفیت مفروض را برای هر لایه نشان می‌دهد. شکل ۱-و سری ضرایب بازتاب تخمین زده‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است عملکرد الگوریتم در بازیابی مکان زمانی بازتاب‌ها و دامنه‌ی بازتابنده‌ها بسیار دقیق بوده است. شکل ۱-ه ردلرزه‌ی بازسازی شده پس از همامیخت موجک چشمه و سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده و اعمال اثر جذب از روی فاکتور کیفیت تخمین زده شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ردلرزه‌ی تخمین زده‌شده برازش بسیار خوبی با ردلرزه‌ی اولیه دارد. برای بررسی دقت عملکرد الگوریتم در بازیابی دامنه‌ی بازتاب‌ها، این مقادیر در رابطه (۱۵) قرار داده شده، نگار امپدانس به دست آمده با نگار امپدانس اولیه مقایسه شده و نتیجه نگار در شکل ۱-ز نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است الگوریتم به دقت دامنه‌ها را بازیابی کرده است به گونه‌ای که امپدانس تخمین زده شده برازش بسیار خوبی با امپدانس اولیه دارد. در شکل ۱-ح نیز مقادیر فاکتور کیفیت تخمین زده‌شده آورده شده است. در مثالی دیگر فرض شده است که دامنه نگار امپدانس مجهول بوده و در تابع هزینه که در رابطه (۱۶) آورده شده است مقدار ξ برابر صفر قرار داده شده است. ردلرزه نشان داده شده در شکل ۲-الف حاصل از همامیخت موجک ریکر با فاز مرکب و فرکانس غالب ۳۰ هرتز با سری ضرایب بازتاب نشان داده شده در

شکل ۲–ب است.

نگار امپدانس مفروض برای این ردلرزه در شکل ۲–ج نشان داده شده است. همان‌طور که گفته شد امپدانس برای این مثال در مسئله وارد نشده است. شکل ۲–د مقادیر فاکتور کیفیت لایه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۲–و سری ضرایب بازتاب تخمین زده‌شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، الگوریتم به خوبی سری ضرایب بازتاب را بازیابی کرده است. ردلرزه‌ی حاصل از هماهمیخت موجک چشمه و سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده در شکل ۲–ه نشان داده شده است؛ که برازش بسیار خوبی با ردلرزه‌ی اولیه دارد. شکل ۲–ز نگار امپدانس تخمین زده را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی این شکل با نگار امپدانس در شکل ۲–ج می‌توان به این نکته پی برد که حتی با مجهول بودن دامنه نگار امپدانس و قرار دادن مقدار صفر به جای آن در تابع هزینه، الگوریتم به دقت آن را بازیابی می‌کند. در نهایت و در شکل ۲–ح مقادیر فاکتور کیفیت تخمین زده شده نشان داده شده است؛ که برازش بسیار خوبی با مقادیر اولیه دارد.



شکل ۱: الف: ردلرزه‌ی مصنوعی؛ ب: سری ضرایب بازتاب صحیح؛ ج: نگار امپدانس صحیح که به عنوان قید و اطلاعات اولیه در تابع هزینه (رابطه ۱۶) وارد می‌شود؛ د: فاکتور کیفیت؛ ه: ردلرزه‌ی بازیابی شده؛ و: سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده؛ ز: نگار امپدانس تخمین زده شده؛ ح: فاکتور کیفیت تخمین زده شده.



شکل ۲. الف: ردلرزه‌ی مصنوعی؛ ب: سری ضرایب بازتاب صحیح؛ ج: نگار امپدانس صحیح که در این مثال دامنه آن وارد تابع هزینه و رابطه ۱۶ نمی‌شود و فرض بر صفر بودن آن است. در اینجا برای مقایسه با نگار امپدانس تخمین زده شده آورده شده است؛ د: فاکتور کیفیت؛ ه: ردلرزه‌ی بازیابی شده؛ و: سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده؛ ز: نگار امپدانس تخمین زده شده؛ ح: فاکتور کیفیت تخمین زده شده.

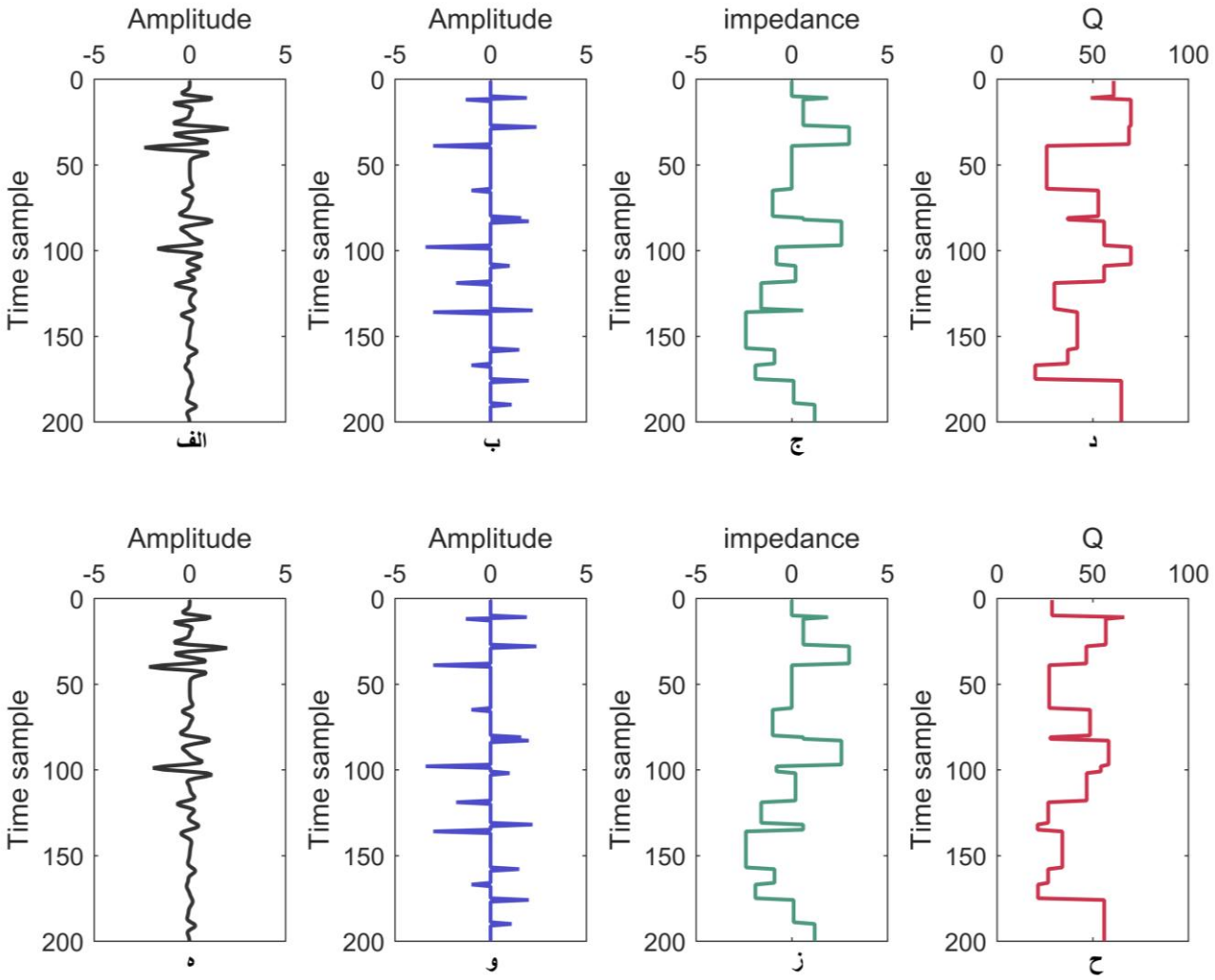
در انتهای این بخش مثالی برای نشان دادن دقت عملکرد الگوریتم در بازیابی سری ضرایب بازتاب در حضور لایه‌ی نازک آورده شده است. در شکل ۳-الف تا ۳-د به ترتیب ردلرزه‌ی مصنوعی، سری ضرایب بازتاب اولیه، نگار امپدانس و فاکتور کیفیت نشان داده شده است. حضور دو اسپایک با فواصل زمانی بسیار نزدیک در محدوده‌ی نمونه‌ی زمانی ۱۰-۱۲ و همچنین ۸۰-۸۲ مشهود است. تداخل موجک‌های بازتاب شده از این دو اسپایک بسیار زیاد بوده به‌گونه‌ای که تفکیک این دو اسپایک بسیار دشوار است و اغلب الگوریتم‌ها در بازیابی اسپایک‌هایی با فواصل زمانی کم، ناتوان هستند. شکل‌های ۳-ه تا ۳-ح به ترتیب ردلرزه‌ی بازسازی شده، سری ضرایب بازتاب، نگار امپدانس و فاکتور کیفیت تخمین زده شده را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، الگوریتم به دقت دو اسپایک نزدیک به هم را تخمین زده و از هم تفکیک کرده است. این امر در تفکیک لایه‌های نازک و تعیین زون‌های مخزنی بسیار کارآمد است. برای مقایسه‌ی عملکرد الگوریتم در حضور نوفه، چهار ردلرزه با واریانس نوفه ۰/۰۱، ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۴-الف تا ۴-د چهار ردلرزه نشان داده شده است. سری ضرایب تخمین زده شده پس از پیاده‌سازی الگوریتم در شکل‌های ۴-ه تا ۴-ح نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، پایداری روش پیشنهادی در حضور نوفه قابل قبول بوده و سری ضرایب بازتاب با دقت بالایی تخمین زده شده است.

۵- مثال واقعی

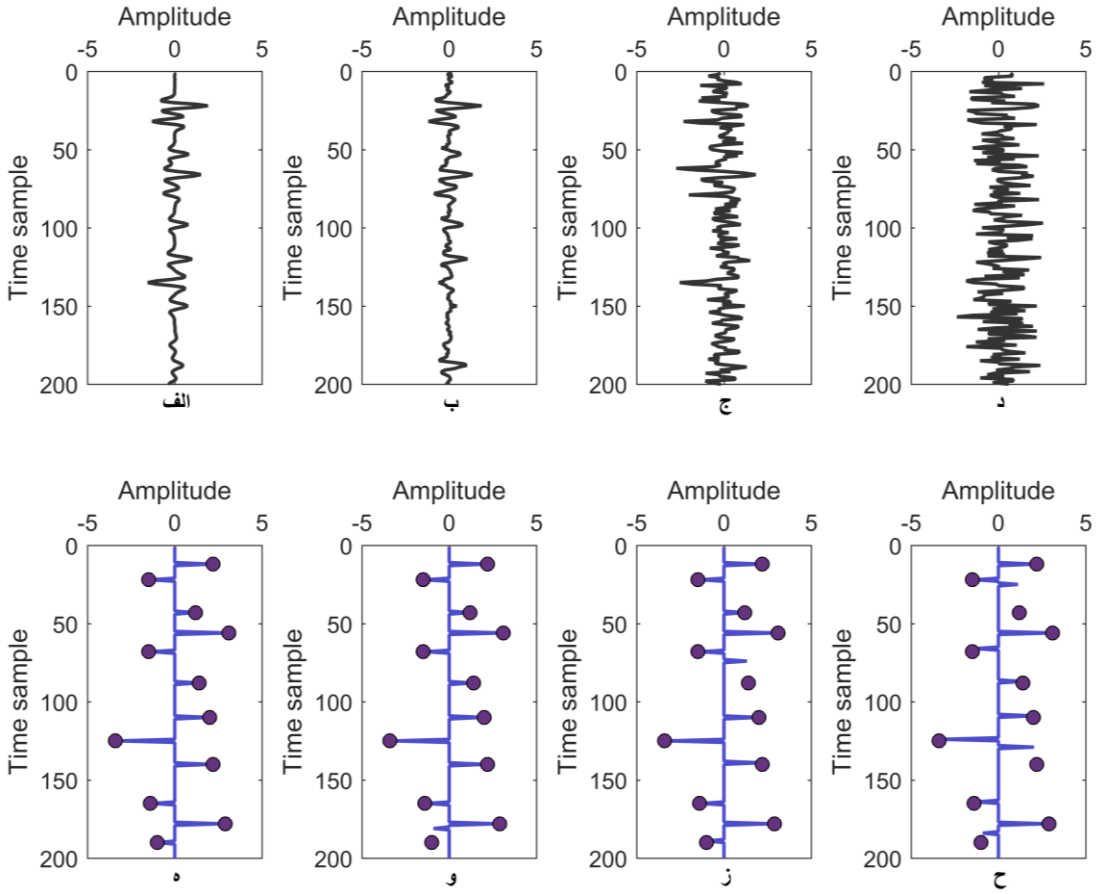
در پایان عملکرد الگوریتم بر یک دسته داده‌ی میدانی پس از برانبارش مورد بررسی قرار گرفته شده است. موجک تخمینی بکار برده شده در این مقاله با روش (Gholami and sacchi, 2013) به دست آمده است. الگوریتم بر روی هر ردلرزه پیاده‌سازی شده و سری

ضرایب بازتاب و مقادیر فاکتور کیفیت به صورت هم‌زمان تخمین زده شده است. نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد این است که مکان زمانی تخمین زده‌شده برای هر ردلرزه به عنوان مدل اولیه برای ردلرزه‌های مجاور مورد استفاده قرار گرفته و دامنه‌ی تخمین زده شده برای ساخت یک نگار امپدانس مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع از اطلاعات به دست آمده از هر ردلرزه به عنوان قید برای ردلرزه‌ی بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر باعث حفظ پیوستگی جانبی می‌شود. شکل ۵-الف مقطع لرزه‌ای پس از برانبارش را نشان می‌دهد. شکل ۵-ب سری ضرایب بازتاب بازیابی شده و شکل ۵-ج مقطع فاکتور کیفیت تخمین زده‌شده را نشان می‌دهد. شکل ۵-د موجک چشمه که با استفاده از روش (Gholami and sacchi, 2013) به دست آمده، نشان داده شده است.

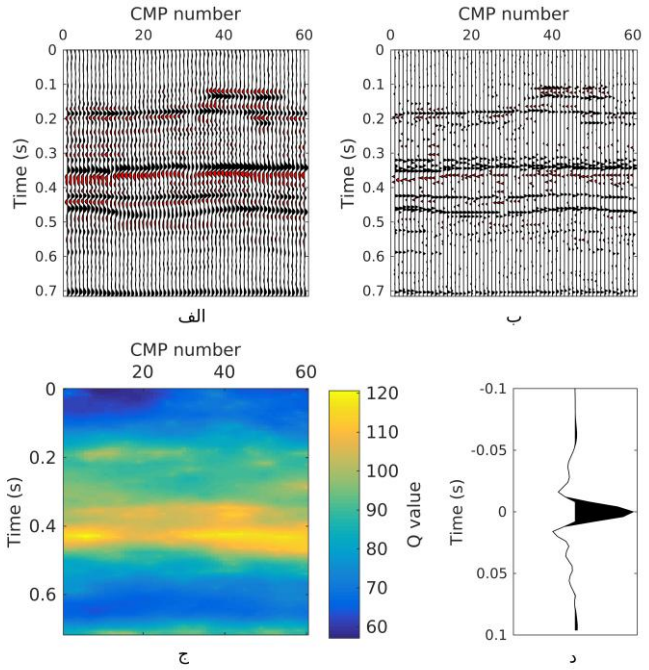
در شکل ۶ به بررسی تغییرات طیف دامنه مقطع لرزه‌ای نشان داده شده در شکل ۵ در قبل و بعد از واهمامیخت پرداخته شده است. در شکل ۶ منحنی آبی رنگ طیف دامنه‌ی مقطع لرزه‌ای پیش از واهمامیخت و منحنی قرمز رنگ طیف دامنه سری ضرایب بازیابی شده را نشان داده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است طیف دامنه پس از واهمامیخت گسترده شده و فرکانس‌های بالا بازیابی شده‌اند.



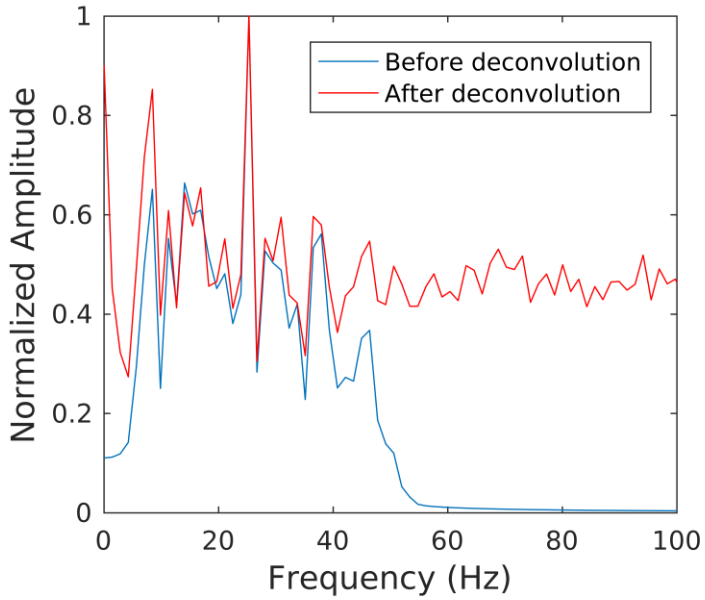
شکل ۳: بررسی عملکرد الگوریتم در بازیابی اسپایک‌ها با فواصل زمانی بسیار کم (۲ نمونه) الف: ردلرزه‌ی مصنوعی؛ ب: سری ضرایب بازتاب صحیح؛ ج: نگار امپدانس صحیح که در این مثال دامنه آن وارد تابع هزینه و رابطه‌ی (۱۶) نمی‌شود و فرض بر صفر بودن آن است. در اینجا برای مقایسه با نگار امپدانس تخمین زده شده آورده شده است؛ د: فاکتور کیفیت؛ ه: ردلرزه‌ی بازیابی شده؛ و: سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده؛ ز: نگار امپدانس تخمین زده شده؛ ح: فاکتور کیفیت تخمین زده شده.



شکل ۴: بررسی عملکرد روش پیشنهادی در حضور نوفه. الف: ردلرزه‌ی آغشته به نوفه با واریانس ۰/۰۱، ب: ردلرزه‌ی آغشته به نوفه با واریانس ۰/۱، ردلرزه‌ی آغشته به نوفه با واریانس ۰/۵، ردلرزه‌ی آغشته به نوفه با واریانس ۰/۹. ردیف پایین از چپ به راست (ه تا ح) سری ضرایب بازتاب تخمین زده شده برای ردلرزه‌های نشان داده شده در قسمت (الف تا د) را نشان می‌دهد.



شکل ۵: پیاده‌سازی الگوریتم بر داده‌ی میدانی. الف: مقطع لرزه‌ای پس از برانبارش، ب: مقطع سری ضرایب بازیابی شده، ج: مقطع فاکتور کیفیت تخمین زده‌شده، د: موجک چشمه‌ی تخمین زده شده.



شکل ۶: مقایسه طیف دامنه مقطع لرزه‌ای، پیش و پس از واهمامیخت. منحنی آبی رنگ، طیف دامنه مقطع لرزه‌ای پیش از واهمامیخت و منحنی قرمز رنگ، طیف دامنه سری ضرایب بازتاب تخمین زده‌شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نوین برای واهمامیخت ناپایا ارائه شد. تخمین هم‌زمان سری ضرایب بازتاب و فاکتور کیفیت لایه‌ها یک مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی بوده که برای حل آن برای اولین بار از الگوریتم تبلور شبیه‌سازی شده استفاده شد. پیش از این روشی برای حل مسئله‌ی واهمامیخت ناپایا که به طور هم‌زمان سری ضرایب بازتاب و فاکتور کیفیت را بازیابی کند ارائه نشده است. با توجه به ویژگی‌های آماری الگوریتم، پاسخ به دست آمده از آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مبتنی بر گرادیان، بسیار دقیق‌تر است. همچنین قید مربوط به امپدانس به عنوان اطلاعات اولیه و با هدف به دست آوردن جوابی دقیق‌تر به مسئله اضافه شده است. دقت عملکرد الگوریتم در بازیابی مکان زمانی و دامنه‌ی بازتابنده‌ها پس از پیاده‌سازی الگوریتم بر داده شبیه‌سازی شده و داده‌ی میدانی به خوبی مشهود است؛ به گونه‌ای که الگوریتم در بازیابی اسپایک‌هایی با فواصل زمانی کم دقیق عمل می‌کند.

۷- مراجع

جهدی، ه. و سیاهکوهی، ح. ر.، ۱۳۸۷، عملگر واهمامیخت متغیر با زمان در حوزه‌ی گابور، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۴ (۱)، ۱۲۳-۱۰۹.

Aki, K. and Richards, P., 2002, Quantitative seismology: Theory and methods, University Science Books.

Bickel, S.H. and Natarajan, R.R., 1985, Plane-wave Q deconvolution, Geophysics, 50, 1426-1439.

Clarke, G.K.C., 1968, Time-varying deconvolution filters, Geophysics, 33, 936-944.

Cohen, W., Greiner, R. and Schuurmans, D., 1994, Probabilistic Hill-Climbing. Computational Learning Theory and Natural Learning Systems, Vol. 2.

Duchi, J., Hazan, E. and Singer, Y., 2011, Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization, Journal of Machine Learning Research, 12, 2121-2159.

Gholami, A., 2015, Semi-blind nonstationary deconvolution: Joint reflectivity and Q estimation, Journal of Applied Geophysics, 117, 32-41.

Gholami, A. and Sacchi, M.D., 2013, Fast 3D Blind Seismic Deconvolution via Constrained Total Variation and GCV, SIAM Journal on Imaging Sciences, 6 (4), 2350-2369.

Gholami, A. and Sacchi, M.D., 2012, A fast and automatic sparse deconvolution in the presence of outliers, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 50 (10), 4105-4116.

Hargreaves, N.D. and Calvert, A.J., 1991, Inverse Q filtering by Fourier transform, Geophysics, 56, 519-527.

Ingber, L. and Rosenm, B., 1992, Genetic Algorithms and very fast Simulated Reannealing, A comparison matl. Compute. Modelling, 16 (11), 87-100.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P., 1983, Optimization by Simulated Annealing, Science, 220 (4598), 671-680.

Seismology, 2nd ed, Cambridge Univ Press.

Van Laarhoven, P.J.M. and Aarts, E.H.L., 1987, Simulated Annealing: Theory and Applications, D. Reidel Publishing.

Velis, D.R., 2008, Stochastic sparse spike deconvolution, Geophysics, 73 (1), R1-R9.

Wang, Y., 2008, Seismic Inverse Q Filtering, Blackwell, Oxford.

Zhang, C. and Ulrych, T.J., 2007, Seismic absorption compensation: A least-squares inverse scheme, Geophysics, 72 (6), 109-114.

Margrave, G.F. and Lamoureux, M.P., 2011, Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by nonstationary deconvolution of seismic data, Geophysics, 76 (3), W15-W30.

Robinson, E.A., 1954, Predictive decomposition of time series with applications to seismic exploration, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Rutenbar, R.A., 1989, Simulated Annealing Algorithms: An Overview, IEEE Circuits and Devices Magazine, 5 (1), 19-26.

Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1983, Exploration

Shahrood University of Technology

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2017, VOL 3, NO 2

(DOI): 10.22044/JRAG.2016.740

Non-stationary deconvolution via stochastic simulated annealing optimization

Akbar Heidari[1], Toktam Zand[1*] and Ali Gholami[2]

1- Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 19 June 2016; Accepted: 11 October 2016

Corresponding author: taktom.zand@ut.ac.ir

Keywords

Non-Stationary Deconvolution
Reflectivity
Seismic Quality Factor
Attenuation Filter
Simulated Annealing Algorithm

Extended Abstract

Summary

Deconvolution is one of the significant steps in seismic signal processing for obtaining high resolution images of subsurface. In this paper, a new non-stationary deconvolution is developed to retrieve the impulse response of the earth and remove the earth attenuation effects from it via a simulated annealing (SA) optimization. The time location of each spike and the corresponding quality factor is estimated by the SA method and its amplitude is calculated using a least-squares method. All three parameters of the reflection coefficient, time lag, and the quality factor for each layer are estimated simultaneously. Available information from well-logs can also be incorporated as a priori information. Numerical examples from simulated and field seismic data show high performance of the proposed algorithm for estimating the reflectivity structure and the model of the quality factor. Numerical examples confirm promising applicability of the new method for processing and interpretation of seismic data. The goal of non-stationary deconvolution is to remove the effects of the source wavelet and the attenuation filter from the data to retrieve the earth impulse response with an enhanced temporal resolution.

Introduction

High resolution images of subsurface, obtained from seismic studies, can serve an important role in the oil and gas exploration industry. One of the main steps in seismic signal processing is deconvolution to increase the temporal resolution of the data. Beside the blurring effect of the source generated pulse, the inhomogeneity and anelasticity of the earth causes a decrease in the resolution of the acquired data due to the absorption and dispersion mechanisms. While propagation, the absorption decreases the strength of the pulse and dispersion leads to a gradual change in its shape. These effects deteriorate the resolution of the subsurface images and need appropriate processing tools for compensating their effects. Simultaneous compensation of these effects is a non-linear and ill-posed problem. In this paper, based on SA, a new algorithm is developed for this task. The performance of the method is tested via numerical examples.

Methodology and Approaches

Many approaches have been proposed for solving non-linear optimization problems such as the hill climbing, the genetic algorithm and the SA methods. One of the advantages of these methods in comparison with the gradient based solvers is their ability to find the global minimizer. Here, we employ the SA method for solving the non-stationary seismic deconvolution. This method escape from trapping in local minima by adding random amounts to the solution space. Most of the algorithms avoid approaching false solutions which may cause trapping in local minima. The SA method, however, prefers evaluating possibly incorrect solutions and calculating its correctness using a probability distribution function based on the amount of the cost function. The other advantage of the SA method is that the uncertainty of the parameters can also be calculated by applying the algorithm several times for searching the whole model space in order to obtain a set of solutions, which fit the data and satisfy the constraints.

Results and Conclusions

In this paper, a stochastic SA-based algorithm, was proposed to solvinge the non-stationary seismic deconvolution problem for simultaneous compensation of the blurring effect of the wavelet and the Q-filtering effects of the earth. The Q-model of the earth is also estimated during the deconvolution. Numerical examples of synthetic and field data confirmed high-performance of the proposed algorithm.