

ترکیب و واترکیب در برداشت و پردازش داده‌های لرزه‌ای

هومن کریمی^{۱*} و علی غلامی^۲

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

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

(دریافت: ۹۳/۲/۱۵، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

در داده‌برداری متعارف، به منظور پرهیز از تداخل پاسخ چشمه‌های مختلف که توسط گیرنده‌ها دریافت می‌شود، آن‌ها را با فاصله زمانی بزرگ نسبت به هم شوت می‌کنند که این امر موجب افزایش زمان و هزینه عملیات می‌شود. بنابراین مفهوم داده‌برداری همزمان یا ترکیبی به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه معرفی می‌شود. در این روش دو یا چند چشمه به‌طور همزمان (با تأخیر زمانی کوتاه) شوت می‌شوند اما جبهه موج حاصل از این چشمه‌ها با هم تداخل می‌کنند. از این رو قبل از تمامی مراحل استاندارد پردازشی، داده‌های ترکیبی باید به صورت رکوردهای مجزا، جداسازی گردد که به این عمل واترکیب (Deblending) گفته می‌شود. در این مقاله ضمن معرفی داده‌برداری ترکیبی، سه روش واترکیب بررسی می‌شود: ۱. روش حل کمترین مربعات (واترکیب کاذب (Psuedo-deblending)) که در آن هیچ منظم‌سازی انجام نمی‌گیرد و تنها معیار درستی، پیش‌بینی جبهه موج ترکیبی است. مشکل این روش این است که داده‌های بازبایی‌شده تحت تأثیر نوفه‌های ترکیبی قرار می‌گیرند. ۲. استفاده از فیلتر بردار-میانه چندبعدی به منظور تضعیف نوفه‌های ترکیبی حاصل از حل کمترین مربعات؛ این روش به عنوان یک فیلتر غیرخطی نمی‌تواند از تضعیف سیگنال‌های همدوس اجتناب کند. ۳. منظم‌سازی ماتریس عملگر واترکیب با فرض محدود بودن باند مکانی داده‌های لرزه‌ای برای چشمه‌های مجاور و متراکم. نتایج اعمال این سه روش روی داده مصنوعی نشان می‌دهد که واترکیب از طریق منظم‌سازی ماتریس عملگر، به دلیل دقت آن در تضعیف نوفه و حفظ سیگنال در مقایسه با دو روش دیگر قابل اعتمادتر است.

واژه‌های کلیدی: داده‌برداری همزمان یا ترکیبی، داده غیرترکیبی، فیلتر میانه برداری، واترکیب

۱. مقدمه

زمان کل عملیات (کاهش در خور توجهی می‌یابد و این امکان را فراهم می‌کند که در زمان کمتر (برای افزایش کیفیت سیگنال) تعداد شوت‌های بیشتری انجام شود اما تداخل پاسخ چشمه‌ها از چالش‌های اساسی این روش محسوب می‌شود. حذف اثر تداخلی این چشمه‌ها واترکیب نامیده می‌شود که خود مرحله پردازشی مهمی را طلب می‌کند.

روش‌های استفاده همزمان از چند چشمه مبحث جدیدی نیست و از مدت‌ها قبل نیز در لرزه‌نگاری به صورت آرایه چشمه مورد توجه بوده است. برای مثال استفاده از چشمه‌های ارتعاشی (Vibratory sources) همزمان که سیگنال‌های مشابه (یا متفاوت) را تولید می‌کنند، توسط سیلورمن (۱۹۷۹) پیشنهاد شد و بعد از آن مفهوم داده‌برداری ترکیبی به وسیله چشمه‌های انفجاری و ارتعاشی نیز مورد توجه محققان قرار گرفت

روش‌های لرزه‌بازتابی به دلیل عمق نفوذ و تفکیک‌پذیری، از روش‌های معمول ژئوفیزیکی است که با طراحی عملیات لرزه‌ای آغاز و در اکتشافات هیدروکربنی به کار برده می‌شود. در طراحی عملیات دو عامل کیفیت و هزینه در کنار هم مورد توجه قرار می‌گیرند. در روش متعارف، برای جلوگیری از تداخل پاسخ چشمه‌های مختلف، آن‌ها را با فواصل زمانی بزرگ نسبت به هم شوت می‌کنند که موجب افزایش زمان و هزینه عملیات می‌شود. از این رو به منظور کاهش هزینه‌ها، مرسوم است که منطقه مورد نظر با نقاط کمتر از حد مورد نیاز نمونه‌برداری گردد که باعث ایجاد دگرنامی مکانی (Spatial aliasing) در داده‌ها می‌شود. برای رفع این مشکل، روش داده‌برداری همزمان یا ترکیبی معرفی شد (سیلورمن، ۱۹۷۹). در این روش فاصله زمانی بین عملکرد چشمه‌ها (و به دنبال آن

توانایی هر روش ارزیابی می‌شود. اما در داده میدان به دلیل چالش‌های عملی موجود در برداشت وضعیت بسیار متفاوتی در مقایسه با داده مصنوعی تجربه می‌شود. به‌طور مثال در داده میدانی تأثیرات دگرنامی مکانی، پیچیدگی لایه‌های سطحی، تغییرات توپوگرافی سطحی، امواج زمین‌غلت و نوفه‌های لرزه‌ای را نباید نادیده گرفت.

۲. تئوری نمونه‌برداری ترکیبی

داده‌برداری ترکیبی دست ما را در مکان‌یابی محل چشمه‌ها و همچنین تعیین زمان نسبی شوت آن‌ها بازتر می‌کند. به‌طور خاص‌تر، در داده‌برداری ترکیبی هر چشمه در برداشت متعارف با یک آرایه چشمه در برداشت ترکیبی جایگزین می‌گردد.

۱.۲. نمایش ماتریسی داده لرزه‌ای

برخووت (۱۹۸۲) نشان داد که داده لرزه‌ای (دو یا سه بعدی) را می‌توان در یک فرم ماتریسی آرایش داد که این ماتریس، ماتریس داده خوانده شده و با حرف **P** نمایش داده می‌شود. در حوزه فرکانس، هر درایه از ماتریس **P** با یکی از عناصر فرکانسی رد لرزه‌ای (Trace) متناظر است که به صورت یک عدد مختلط نشان داده می‌شود. نمایش ماتریسی از داده لرزه‌ای برای تک فرکانس به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$\mathbf{P}(z_d, z_s) = \mathbf{D}(z_d) \mathbf{X}(z_d, z_s) \mathbf{S}(z_s) \quad (1)$$

که در آن، $\mathbf{D}(z_d)$ معرف ماتریس گیرنده، $\mathbf{X}(z_d, z_s)$ معرف تابع عبور چندبعدی زمین و $\mathbf{S}(z_s)$ معرف ماتریس چشمه در برداشت نقطه عمقی مشترک هستند. همچنین z_d و z_s به ترتیب با عمق چشمه و گیرنده متناظر می‌باشند. ماتریس داده **P** از مرتبه $K \times N$ (K تعداد گیرنده‌ها و N تعداد چشمه‌ها) است که هر ستون آن متناسب با رکورد چشمه مشترک، هر سطر آن متناسب با رکورد گیرنده مشترک، قطر اصلی آن متناسب با رکورد دورافت مشترک و قطر فرعی آن متناظر با رکورد هم‌میان نقطه است. شکل ۱ نمایشی شماتیک از مدل‌سازی مستقیم را

(گروتا، ۱۹۸۳؛ وومک و همکاران، ۱۹۹۰). اما این تحقیقات در سال‌های اخیر به دلایل متفاوت از جمله نیاز بیشتر به تولید و پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه محاسبات پردازش سیگنال و تصویر مورد توجه بیشتری قرار گرفت و روش‌های متفاوتی برای واترکیب ابداع شد. این روش‌ها شامل کدگذاری فازی چشمه‌ها (باگانی، ۲۰۰۶؛ ایکل، ۲۰۰۷؛ نیلمانی و همکاران، ۲۰۱۰)، استفاده از فاصله زمانی تصادفی بین چشمه‌ها (آکربرگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هامپسون و همکاران، ۲۰۰۸)، استفاده از فیلترهای میانه (ونگ، ۲۰۰۰؛ ژانگ و اولریچ، ۲۰۰۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۹)، پیش‌بینی و کاهش سیگنال‌های ناخواسته (مهداد و همکاران، ۲۰۱۱؛ شودونگ‌هو و همکاران، ۲۰۱۲) و استفاده از منظم‌سازی با قیدهای مناسب (برخووت، ۲۰۰۸؛ آبا و همکاران، ۲۰۱۰؛ منصور و همکاران، ۲۰۱۱) است.

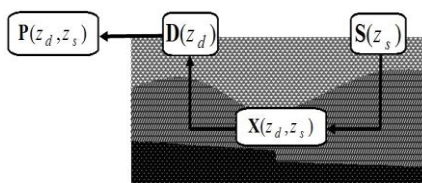
این مقاله به بررسی و حل مسئله واترکیب به سه روش می‌پردازد: ۱. واترکیب اثر چشمه‌های همزمان مسئله‌ای بدوضع (Ill-posed) است، بدین معنا که به دلیل فرومعین (Underdetermined) بودن مسئله وارون‌سازی در واترکیب، راه‌حل‌های بی‌شماری برای آن می‌توان در نظر گرفت. بنابراین استفاده از قیدهای اضافی (پراکندگی و همدوسی) ضروری به نظر می‌رسد. یکی از روش‌های معمول در حل مسائل بدوضع استفاده از روش کمترین مربعات است. ۲. روش دوم بر پایه فیلترینگ با استفاده از فیلتر بردار-میانه چندبعدی است. این روش بر اساس توزیع پراکنده جبهه موج ترکیبی در رکوردهای هم‌میان نقطه عمل می‌کند و از مفهوم مقدار میانه چند بعدی استفاده می‌کند. به طوری که ابتدا مقدار میانه در چند راستای مختلف مشترک در یک نقطه محاسبه و سپس کمترین مقدار میانه حاصل به آن نقطه نسبت داده می‌شود. ۳. روش سوم بر پایه منظم‌سازی است. با توجه به محدود بودن باند مکانی داده‌های لرزه‌ای برای چشمه‌های مجاور و مترکم، واترکیب به کمک منظم‌سازی ماتریس عملگر و بدون در نظر گرفتن قیدهای پراکندگی و ناهمدوسی بررسی می‌شود.

در نهایت هر سه روش روی داده مصنوعی اعمال و

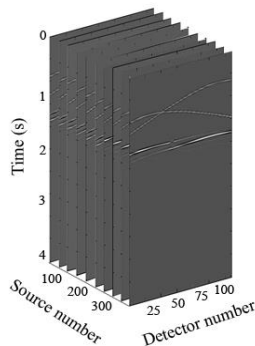
است، باید به صورت رکوردهای تک چشمه سازنده‌اش جداسازی شود. برای حل این معادله باید از وارون‌سازی ماتریسی استفاده شود. اما در واترکیب به کمک وارون‌سازی، با توجه به اینکه مطابق شکل ۳ تعداد ستون‌های ماتریس \mathbf{P}' کمتر از ماتریس \mathbf{P} است و از طرفی عملگر ترکیبی \mathbf{B} یک ماتریس غیرمربعی و بنابراین وارون‌ناپذیر است، رابطه ۵ جواب یکتا نخواهد داشت.

۳. انجام واترکیب

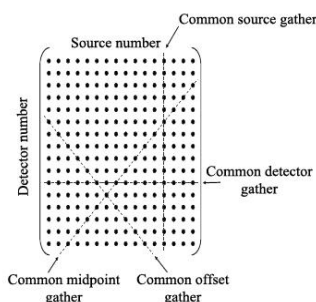
با توجه به این واقعیت که در واترکیب با یک مسئله فرومعین روبه‌رو هستیم، وارون‌سازی به شکل ساده امکان‌پذیر نیست. در این بخش سه روش مختلف در حل مسئله واترکیب معرفی می‌شود.



شکل ۱. نمایش شماتیک مدل‌سازی مستقیم جبهه موج لرزه‌ای.



(الف)



(ب)

شکل ۲. (الف) مکعب داده و (ب) ساختار ماتریس تک فرکانس مربوطه (یک مقطع افقی از مکعب بعد از اعمال تبدیل فوری در راستای زمان).

نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲-الف مکعب داده (حاصل از مدل شکل ۱) و یک ماتریس تک‌فرکانس مربوط به آن نشان داده شده است. به طور کلی، ترکیب چشمه‌ها برای یک فرکانس به صورت رابطه (۲) فرمول‌بندی می‌شود:

$$\mathbf{P}'(z_d, z_s) = \mathbf{P}(z_d, z_s) \mathbf{B}(z_s) \quad (2)$$

ماتریس \mathbf{B} ماتریس ترکیبی خوانده می‌شود. این ماتریس از مرتبه $N \times N/n$ است که n تعداد چشمه‌های حاضر در یک گروه چشمه می‌باشد. هر ستون ماتریس \mathbf{B} با آرایه چشمه ترکیب شده متناظر و هر درایه آن بیان‌کننده کدگذاری چشمه است که به چشمه‌های منحصربه‌فردی داده می‌شود و می‌تواند برحسب فاز یا بزرگی باشد. به عنوان مثال، زمانی که هر گروه چشمه شامل دو چشمه مجاور باشد ($n = 2$) ماتریس \mathbf{B} به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_3 & \dots & 0 \\ 0 & b_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & b_{N-1} \\ 0 & 0 & \dots & b_N \end{pmatrix} \quad (3)$$

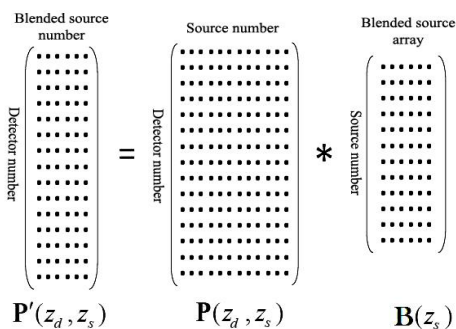
به طوری که $b_i = \exp(-j\omega t_i)$. ضرب ماتریسی رابطه ۲ نشان می‌دهد که ماتریس داده ترکیبی \mathbf{P}' از مرتبه $K \times N/n$ است. ضرب ماتریسی رابطه ۲ را می‌توان به کمک شکل ۳ و رابطه ۴ به صورت جمع چشمه‌های با آرایش زمانی تفسیر کرد. اگر کدگذاری چشمه به صورت زمان تأخیر در نظر گرفته شود، این فرایند مطابق شکل ۴ می‌تواند به صورت شیفت زمانی T و جمع رکورد چشمه‌ها شبیه‌سازی شود.

$$\mathbf{P}'_l(z_d, z_s) = \sum_k \mathbf{P}_k(z_d, z_s) \mathbf{B}_{kl} \quad (4)$$

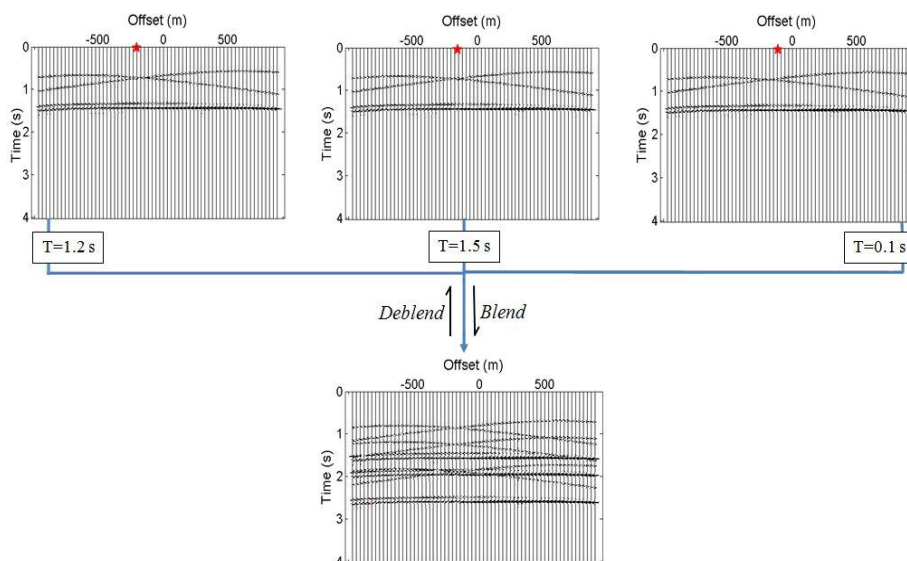
هدف واترکیب، بازیابی ماتریس داده غیر ترکیبی \mathbf{P} از ماتریس داده ترکیبی \mathbf{P}' برای فرکانس‌های مختلف یا به عبارت دیگر حل رابطه (۵) است:

$$\mathbf{P}'(z_d, z_s) - \mathbf{P}(z_d, z_s) \mathbf{B}(z_s) = 0 \quad (5)$$

در واقع رکورد چشمه مشترک ترکیبی نشان داده شده در شکل ۴ که شامل پاسخ چشمه‌های همزمان



شکل ۳. تفسیر ضرب ماتریسی به صورت جمع چشمه‌های با آرایش زمانی؛ رکورد چشمه‌های ترکیبی که به صورت جمع رکورد چشمه‌های جدا شبیه‌سازی شده است.



شکل ۴. شبیه‌سازی یک رکورد ترکیبی حاصل از ترکیب سه رکورد چشمه مشترک با تأخیر زمانی T (با توجه به رابطه ۴).

داده‌های ترکیب شده هم‌خوانی دارد، به دست خواهد آمد. با توجه به رابطه ۳، $\mathbf{B}^\dagger \mathbf{B}$ یک ماتریس قطری است. در حالتی که گروه‌های چشمه شامل دو چشمه مجاور با فاصله زمانی ثابت هستند و $b_1 = b_3 = b_5 = \dots = b_{N-1} = \exp(-j\omega t_1)$ و $b_2 = b_4 = b_6 = \dots = b_N = \exp(-j\omega t_2)$ ، $\mathbf{B}^\dagger \mathbf{B}$ به صورت ضریبی از ماتریس یک‌که در می‌آید $(\mathbf{B}^\dagger \mathbf{B} = 2\mathbf{I})$ ؛ بنابراین وارون \mathbf{B} با ترانهاده مزدوج آن متناظر است:

$$\mathbf{P}_{Ls} = C (\mathbf{P}^\dagger \mathbf{B}^\dagger) \quad (۸)$$

این عملگر را عملگر واترکیب کاذب می‌نامند. \mathbf{P}_{Ls} حل حاصل از واترکیب کاذب و C ضریب ثابت است (مهرداد و همکاران، ۲۰۱۱). این روش داده ترکیبی را باز کرده و سیگنال‌ها را در حوزه مکان-زمان به موقعیت

۳.۱. روش کمترین مربعات (واترکیب کاذب)

همان‌طور که اشاره شد، ماتریس ترکیبی وارون‌پذیر نیست؛ بنابراین استفاده از روش کمترین مربعات ممکن است به ما کمک کند. حل کلی رابطه (۵) به عنوان یک مسئله فرومعیین به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) است (منکه، ۱۹۸۹):

$$\mathbf{P}_{Ls} = \mathbf{P}^\dagger \mathbf{B}_{inv} \quad (۶)$$

$$\mathbf{B}_{inv} = (\mathbf{B}^\dagger \mathbf{B} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{B}^\dagger \quad (۷)$$

که در آن، \mathbf{B}^\dagger ترانهاده مزدوج ماتریس \mathbf{B} ، \mathbf{P}_{Ls} حل کمترین مربعات میراشده و \mathbf{B}_{inv} وارون کمترین مربعات منظم‌شده ماتریس ترکیبی \mathbf{B} است. عبارت $\alpha \mathbf{I}$ به منظور منظم‌سازی به کار برده می‌شود که در صورت حضور نداشتن نوفه می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. در این صورت جوابی با کمترین انرژی که با

(۱۰) برای هنج یک برابر سه می‌باشد. درحالی که میانه حاصل از رابطه (۱۰) برای هنج دو برابر چهار است. مرتبه هنج بسته به کاربردهای مختلف قابل تغییر است، پس تعریف کمترین فاصله به کمک رابطه در مقایسه با مرتب‌سازی کاربرد بیشتری دارد.

برای فیلتر میانه برداری رابطه (۹) می‌تواند برای تعریف بردار و به صورت زیر تعمیم داده شود:

$$D(\mathbf{X}_j) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|_l, \quad \mathbf{X}_j \in \{\mathbf{X}_i | i=1,2,\dots,N\} \quad (11)$$

رابطه (۱۱) شباهت زیادی به رابطه (۹) دارد؛ با این تفاوت که عدد x_i به بردار \mathbf{X}_i تغییر پیدا می‌کند. بنابراین بردار میانه به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\mathbf{X}_m = \arg_{\mathbf{X}} \min D(\mathbf{X}_j) \quad (12)$$

مشاهده می‌شود که فیلتر میانه عددی می‌تواند حالت خاصی از فیلتر میانه برداری در نظر گرفته شود. بر اساس تعریف فیلتر میانه برداری، ایجاد فیلتری به منظور واترکیب داده‌های ترکیبی امکان‌پذیر به نظر می‌رسد. المان‌های بردار می‌تواند از پنجره زمانی در بردارنده تریس‌ها انتخاب شود. سپس، فیلتر میانه برداری روی بردارهای مجاور بیرون کشیده شده از تریس‌های مجاور در رکورد هم‌میان نقطه اعمال می‌گردد. در نهایت نمونه مرکزی از بردار میانه حاصل، به عنوان خروجی در مرکز پنجره قرار می‌گیرد.

در فیلتر میانه برداری، فرض شد که بردارهای ورودی در پنجره‌های زمانی مشابه روی تریس‌های مجاور شکل می‌گیرند. به عبارت دیگر بردارها در طول برش‌های زمانی یکسان ایجاد می‌شوند و این مسئله مستلزم این است که رویدادهای واقع در داده لرزه‌ای مسطح باشند. دستیابی به رویدادهای کاملاً مسطح در رکورد هم‌میان نقطه حتی بعد از اعمال برونراند نرمال نیز دشوار به نظر می‌رسد. بنابراین برای حل این مسئله همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، فیلتر میانه برداری را در طول شیب‌های متفاوت اعمال کرده و مفهوم فیلتر بردار-میانه چندبعدی معرفی می‌گردد تا بدین طریق از قید مسطح بودن الزامی رویدادها رهایی

درست خودشان انتقال می‌دهد، اما نوفه‌های ترکیبی را از بین نمی‌برد. این دسته از نوفه‌ها در تمام رکوردها به جز چشمه مشترک به صورت نوفه‌های ناهمدوس یا خیزک (Spike) ظاهر می‌شوند. در حقیقت، در واترکیب کاذب (رابطه ۸) سیگنال مورد نظر به لحاظ فازی اصلاح و تأخیر زمانی آن برداشته می‌شود، اما نوفه‌های ترکیبی (سیگنال‌های ناخواسته) مقداری فاز اضافی به دست می‌آورند زیرا تأخیر زمانی چشمه‌های مختلف متفاوت است. بنابراین، با توجه به تمایز بین سیگنال‌های همدوس و نوفه‌های ناهمدوس و اعمال روش‌های تضعیف نوفه می‌توان این نوفه‌ها را از بین برد و در نهایت به یک داده غیر ترکیبی ایده‌آل دست یافت. در ادامه از فیلتر بردار-میانه چندبعدی به منظور تضعیف نوفه استفاده می‌شود.

۳.۲. واترکیب از طریق فیلتر بردار-میانه چندبعدی

فیلتر میانه عددی به کمک مرتب‌سازی اعمال می‌شود. مجموعه‌ای از اعداد $\{x_i | i=1,2,\dots,N\}$ را در نظر بگیرید. پس از مرتب‌سازی این مجموعه اعداد به صورت افزایشی یا کاهشی، مقدار واقع در میانه (وسط) این مجموعه، مقدار میانه تعریف می‌شود. به عبارتی این فیلتر، کمینه مجموع فواصل اعضای مجموعه نسبت به یک مقدار میانی تعریف می‌شود که مجموع فواصل به صورت رابطه (۹) فرمول‌بندی می‌شود:

$$D(x_j) = \sum_{i=1}^N \|x_j - x_i\|_l, \quad x_j \in \{x_i | i=1,2,\dots,N\} \quad (9)$$

به طوری که $j=1,2,\dots,N$ و l مرتبه هنج (Norm) را نشان می‌دهد. بنا بر این مقدار میانه x_m به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_m = \arg_{x_j} \min D(x_j) \quad (10)$$

در صورتی که از هنج یک استفاده شود ($l=1$)، مقدار میانه به دست آمده از هر دو روش یکسان است اما در صورتی که از هنج غیر از یک استفاده شود، میانه حاصل از مرتب‌سازی با میانه حاصل از رابطه ۱۰ متفاوت است. به طور مثال، برای مجموعه اعداد $\{1,2,3,4,1000\}$ میانه حاصل از مرتب‌سازی و رابطه

که در آن، $\gamma(x_1, \omega)$ تابع گسترش نقطه‌ای پایه (Basic point-spread function) نامیده می‌شود. ω فرکانس زاویه‌ای و x_1 مکان چشمه است. محدودیت بانندی کمک می‌کند که مشکل فرومیین بودن جواب رابطه (۵) برطرف شده و ماتریس \mathbf{P} با مرتبه $K \times N$ از ماتریس \mathbf{P}' با مرتبه $K \times N/n$ به دست آید. این راه حل به صورت زیر توجیه می‌شود: یک گروه چشمه ترکیبی شامل n چشمه مجاور را در نظر بگیرید. طول مکانی این گروه $n \Delta s$ می‌شود که Δs فاصله چشمه‌های جدا از هم است. این گروه چشمه تا زمانی که رابطه زیر برقرار باشد، بدون دگرنامی نمونه برداری می‌شود:

$$|\omega|/c_a < \pi/n\Delta s \quad (16)$$

نمونه برداری بدون دگرنامی امکان درونیابی را به ما می‌دهد. بنابراین، تا زمانی که رابطه (۱۶) برقرار باشد، درونیابی بین گروه‌های چشمه امکان پذیر است؛ بدین معنی که ماتریس \mathbf{P}' با مرتبه $K \times N/n$ می‌تواند به صورت یک ماتریس از مرتبه $K \times N$ درونیابی شود، در نتیجه رابطه (۵) یک مسئله فرومیین نیست و می‌توان ماتریس \mathbf{P} با مرتبه $K \times N$ را از رابطه (۵) به دست آورد. در ادامه کار، اگرچه از درونیابی ماتریس \mathbf{P}' و در نهایت به دست آوردن \mathbf{P} استفاده نمی‌شود، اما یک مدل باند محدود از عملگر واترکیب \mathbf{B}_{inv} ایجاد و با توجه به رابطه (۶)، مستقیم روی ماتریس داده ترکیبی \mathbf{P}' اعمال می‌گردد.

با در نظر گرفتن تابع گسترش نقطه‌ای $\gamma(x_1, \omega)$ در رابطه (۱۵)، مدل باند محدود از عملگر واترکیب \mathbf{B}_{inv} به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود:

$$\mathbf{B}_{inv} = (\mathbf{B}^\dagger \Gamma \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^\dagger \Gamma \quad (17)$$

که در آن، Γ شامل نسخه‌های مجزا از تابع گسترش نقطه‌ای است:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \dots \\ \gamma_{-1} & \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \dots \\ \gamma_{-2} & \gamma_{-1} & \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (18)$$

به طوری که $\gamma_p = \gamma(p\Delta s, \omega)$. ماتریس Γ با مرتبه $N \times N$ ماتریس گسترش نقطه‌ای پایه نامیده می‌شود.

پیدا شود (شودونگ هو و همکاران؛ ۲۰۱۲). بدین منظور فیلتر بردار-میانه چندبعدی برای هنج l به صورت رابطه (۱۳) فرمول بندی می‌گردد:

$$D(\mathbf{X}_j^{(R)}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{X}_j^{(R)} - \mathbf{X}_i^{(R)}\|_l, \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_j^{(R)} \in \{ \mathbf{X}_i^{(R)} | i = 1, 2, \dots, N ; R = R_{\min}, \dots, R_{\max} \}$$

$$\mathbf{X}_m^{(R)} = \arg_{\mathbf{X}} \min D(\mathbf{X}_j^{(R)}) \quad (14)$$

که در آن، R بیان کننده جهت و $\mathbf{X}_j^{(R)}$ برداری از مجموعه و در راستای R است. با توجه به رابطه (۱۳)، فاصله تابعی از اندیس تریس مکانی j و جهت R است. کمترین فاصله، بردار میانه در نظر گرفته و نمونه مرکزی بردار میانه به عنوان خروجی انتخاب می‌شود. مفهوم فیلتر بردار-میانه چندبعدی در شکل ۵ نشان داده شده است، به طوری که بخش‌هایی از تریس لرزه‌ای به عنوان بردار عمل کرده و گروهی از بردارها در یک پنجره زمان-مسافت شکل گرفته‌اند. با توجه به رابطه (۱۳) برای هر جهت R ، یک بردار میانه از پنجره در نظر گرفته و کمترین فاصله در بین تمامی جهت‌های R موجود (R_3 در شکل ۵) به عنوان خروجی نهایی انتخاب می‌شود. این فرآیند برای تمامی نمونه‌های تریس مرکزی تکرار می‌گردد. طول بردار از طریق تکرار و آزمایش تعیین می‌شود و به طور معمول باید نصف شکل موج را پوشش دهد.

۳.۳. واترکیب از طریق وارون سازی مستقیم ماتریس عملگر

در حوزه $f-k$ (عدد موج-فرکانس)، پهنای باند مکانی پاسخ چشمه‌ها بین مثبت و منفی $|\omega|/c_a$ قرار می‌گیرد که $c_a = c/\sin \alpha_{\max}$ ، c سرعت انتشار و α_{\max} بزرگ‌ترین زاویه پراکندگی در بالاترین لایه است. فیلتر متناظر در حوزه مکان-فرکانس به کمک تابع سینک (Sinc) (رابطه ۱۵) تعریف می‌شود (ویینار و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\gamma(x_1, \omega) = \frac{\sin(|\omega|x_1/c_a)}{\pi x_1} \quad (15)$$

را بعد از اعمال فیلتر بردار-میانه چندبعدی نشان می‌دهد. در شکل ۸-ج نوبه‌های ناهمدوس (سیگنال‌های ناخواسته) حذف شده مشاهده می‌شود.

پس از اعمال فیلتر بردار-میانه چندبعدی روی تمامی رکوردهای هم‌میان نقطه و کنار هم قرار دادن آن‌ها، داده غیرترکیبی مورد نظر حاصل می‌شود. شکل ۹-الف نشان‌دهنده جبهه موج حاصل از واترکیب کاذب است که داده ترکیبی را باز و سیگنال‌ها را در حوزه مکان-زمان به موقعیت درست خودشان انتقال داده اما اثر سیگنال‌های ناخواسته را از بین نبرده است. در حالی که شکل ۹-ب جبهه موج بازیابی شده توسط فیلتر بردار-میانه چندبعدی را نشان می‌دهد که به داده متعارف به دست آمده از چشمه متناظر (شکل ۷-ب) شباهت بسیاری دارد.

در ادامه واترکیب از طریق وارون‌سازی مستقیم روی داده ترکیبی شکل ۷-ج اعمال می‌شود. بدین منظور تابع گسترش نقطه‌ای مورد نیاز ایجاد می‌شود که از لحاظ مکانی باند محدود است. شکل ۱۰-الف باند عبور تابع گسترش نقطه‌ای در حوزه عدد موج-فرکانس را نشان می‌دهد (رابطه ۱۵). شکل ۱۰-ب برش مقطعی از تابع گسترش نقطه‌ای را نشان می‌دهد. رویدادهای اطراف $t = 0$ و دورافت (Offset) صفر، همان تابع گسترش نقطه‌ای $\gamma(x_1, \omega)$ است که با $n\Delta s = 10m$ نمونه‌برداری شده است (عکس تبدیل فوریه از رابطه ۱۹). رویدادهای توزیع شده بین ۲- و ۲ برای سیگنال‌های ناخواسته در نظر گرفته شده و در فرایند واترکیب ضروری است.

در نهایت یک پارامتر پایدارسازی فرکانسی مستقل به قطر ماتریس Γ' اضافه می‌شود. این پارامتر 10^{-4} برابر بزرگ‌ترین درایه ماتریس Γ' در تمام فرکانس‌هاست. ماتریس Γ' را پس از پایدارسازی وارون کرده و به کمک رابطه ۱۷ عملگر واترکیب B_{inv} برای تک تک مؤلفه‌های فرکانسی ایجاد می‌شود. این ماتریس را برای هر مؤلفه فرکانسی و با توجه به رابطه ۶ روی ماتریس داده ترکیبی P' اعمال شده و داده غیرترکیبی P به دست می‌آید. ستون مرکزی ماتریس P را بیرون

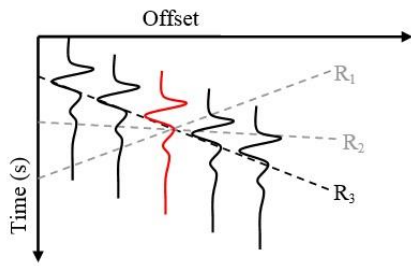
برای داده‌برداری‌های ترکیبی ماتریس گسترش نقطه‌ای Γ' با مرتبه $N/n \times N/n$ به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$\Gamma' = B^\dagger \Gamma B \quad (19)$$

توجه کنید که قرارگرفتن Γ بین B و B^\dagger در رابطه (۱۹) خصوصیات این ضرب ماتریسی را کاملاً تغییر می‌دهد. برخلاف ضرب $B^\dagger B$ در رابطه (۷) که هیچ نقشی در فرایند واترکیب ایفا نمی‌کند، $\Gamma' = B^\dagger \Gamma B$ شامل نسخه شیفت یافته از تابع گسترش نقطه‌ای پایه است که برای سیگنال‌های ناخواسته ناشی از تداخل داده‌برداری هم‌زمان در نظر گرفته شده است. بنابراین وارون ماتریس $B^\dagger \Gamma B$ در رابطه (۱۷) اثر سیگنال‌های ناخواسته را از بین می‌برد (ویپنار و همکاران، ۲۰۱۲).

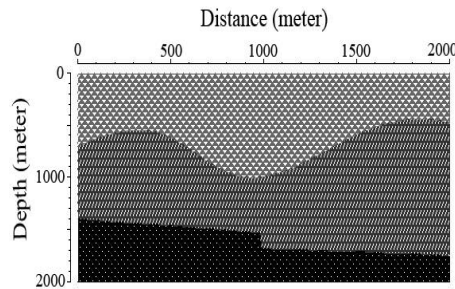
۴. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

در یک مثال، واترکیب روی داده عددی شبیه‌سازی شده اعمال می‌شود. شکل ۶ یک ساختار زیرزمینی را نشان می‌دهد. کمترین سرعت در بالاترین لایه $c = 2000 \text{ m/s}$ است. ۳۸۴ چشمه به فاصله $\Delta s = 5 \text{ m}$ در سطح قرار می‌گیرد. تابع چشمه، موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۳ هرتز است و پاسخ‌های بازتابی در سطح زمین را ۱۲۸ گیرنده ثبت می‌کنند که فاصله بین آن‌ها ۱۵ متر است. داده‌برداری ترکیبی به کمک ۱۹۲ گروه چشمه صورت می‌گیرد که هر گروه ۲ چشمه مجاور را شامل می‌شود ($n=2$). زمان عملکرد چشمه‌های حاضر در یک گروه، به صورت تصادفی و در یک توزیع نامنظم بین صفر تا ۲ ثانیه انتخاب شد. شکل ۷ دو رکورد چشمه حاصل از داده‌برداری متعارف و رکورد ترکیبی آن‌ها را نمایش می‌دهد. اثر سیگنال‌های ناخواسته مربوط به چشمه دیگر در داده ترکیبی (شکل ۷-ج) دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌گردد اگر جبهه موج حاصل از واترکیب کاذب به صورت رکوردهای هم‌میان نقطه مرتب شود، انرژی سیگنال‌های ناخواسته به صورت نوبه‌های ناهمدوس (خیزک) ظاهر می‌شوند. شکل ۸-الف ب رکورد هم‌میان نقطه نشان داده شده در شکل ۸-الف

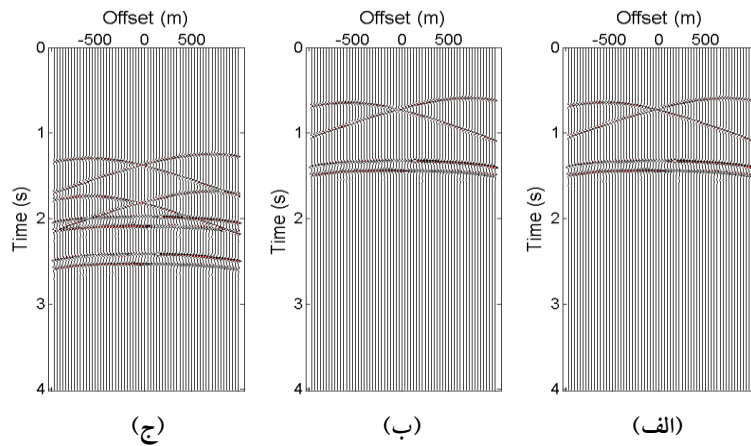


شکل ۵. خروجی نهایی فیلتر بردار-میانه چندبعدی که در طول رد لرزه‌ای مرکزی قرمز رنگ تعریف می‌شود (شودونگ‌هو و همکاران، ۲۰۱۲).

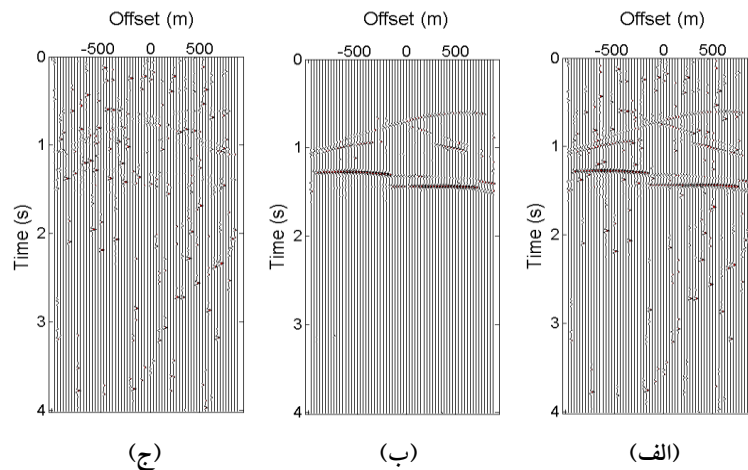
کشیده و با اعمال عکس تبدیل فوریه روی آن، جبهه موج حاصل از واترکیب در حوزه مسافت-زمان به دست می‌آید که در شکل ۹-ج نمایش داده شده است. این نتیجه به داده متعارف به دست آمده از چشمه متناظر شباهت بسیاری دارد که در شکل ۷-ب نشان داده شده است.



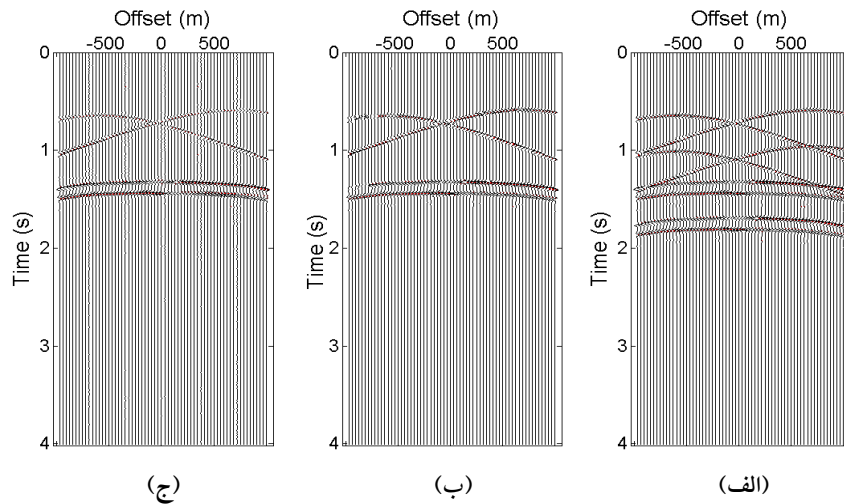
شکل ۶. مدل ناهمگن از زیر زمین.



شکل ۷. (الف) رکورد چشمه ۱۹۷م، (ب) رکورد چشمه ۱۹۸م و (ج) رکورد ترکیبی دو چشمه با تأخیر زمانی $T_2 = 1/2s$ و $T_1 = 0/54s$.



شکل ۸. (الف) رکورد هم‌میان نقطه از جبهه موج حاصل از واترکیب کاذب، (ب) رکورد هم‌میان نقطه بعد از اعمال فیلتر بردار-میانه چندبعدی و (ج) نوفه‌های ناهمدوس حذف‌شده (تفاوت بین (الف) و (ب)).



شکل ۹. (الف) جبهه موج حاصل از واترکیب کاذب مربوط به چشمه ۱۹۸م، (ب) جبهه موج حاصل از واترکیب توسط فیلتر بردار-میانه چندبعدی مربوط به چشمه ۱۹۸م و (ج) جبهه موج حاصل از وارون‌سازی مستقیم مربوط به چشمه ۱۹۸م.

اعمال می‌کنیم. به عبارت دیگر، چشمه‌های حاضر در یک گروه که با فاصله زمانی بین ۰ تا ۲ ثانیه نسبت به هم عمل می‌کنند، دقیق مجاور هم نبوده و به‌طور تصادفی از هر نقطه در سطح داده‌برداری شوت می‌شوند. نمودار میانگین مربعات خطا برای $n = 2$ تا $n = 20$ در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با بیشتر شدن تعداد چشمه‌های حاضر در هر گروه، خطا افزایش می‌یابد تا جایی که به ازای $n = 12$ افزایش ناگهانی در خطا مشاهده می‌شود. افزایش ناگهانی در میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که در این حالت (توزیع تصادفی چشمه‌های حاضر در هر گروه) نیز واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم به ازای $n \geq 12$ برای مدل نشان داده شده در شکل ۶ قابل اعتماد نیست که این موضوع در شکل ۱۲ به خوبی نشان داده شده است. در واقع شکل ۱۲-ب جبهه موج حاصل از واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم مربوط به چشمه میانی (چشمه ۱۹۸م) را برای $n = 12$ نشان می‌دهد که با جبهه موج اصلی حاصل از داده‌برداری متعارف در شکل ۱۲-د کاملاً متفاوت است. به بازتابنده‌های کاذب ایجاد شده در شکل ۱۲-ب توجه کنید که موجب گمراهی در تفسیر داده می‌شوند.

بنابراین، با توجه به نمودارهای ۱۱-الف و ۱۱-ب نتیجه می‌گیریم که برای مدل نشان داده شده در شکل ۶ تا زمانی که $2 \leq n < 12$ باشد، می‌توان از وارون‌سازی

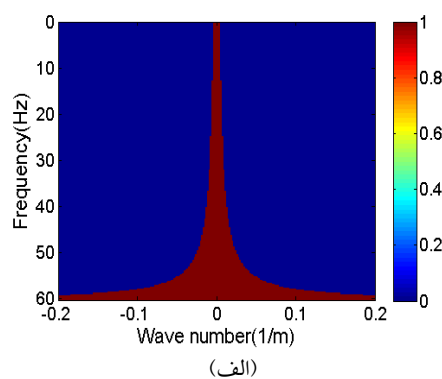
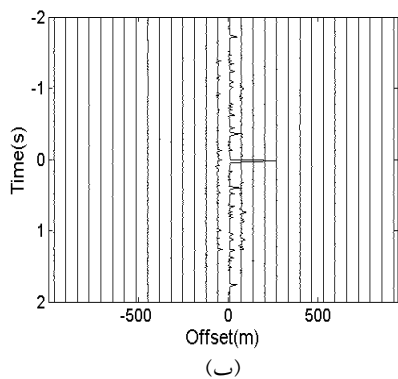
در مدل شکل ۶ تعداد چشمه‌های حاضر در هر گروه را از $n = 2$ تا $n = 20$ تغییر می‌دهیم و از وارون‌سازی مستقیم ماتریس عملگر به منظور واترکیب استفاده می‌کنیم. چشمه‌های مجاور در یک گروه قرار می‌گیرند. نمودار میانگین مربعات خطا بین داده حاصل از واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم و داده به دست آمده از طریق داده‌برداری متعارف در شکل ۱۱-الف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود، مقدار خطا در حضور نوفه در مقایسه با حالت بدون نوفه، به طور کلی بیشتر است. همچنین با افزایش تعداد چشمه‌های حاضر در هر گروه خطا افزایش می‌یابد تا جایی که به ازای $n = 12$ افزایش ناگهانی در خطا مشاهده می‌شود. این افزایش ناگهانی در میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم به ازای $n \geq 12$ برای این مدل شکل ۶ قابل اعتماد نیست که این موضوع در شکل ۱۲ به خوبی نشان داده شده است. به طوری که شکل ۱۲-الف جبهه موج حاصل از واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم مربوط به چشمه میانی (چشمه ۱۹۸م) را برای $n = 12$ نشان می‌دهد که با جبهه موج متناظر حاصل از داده‌برداری متعارف در شکل ۱۲-د تفاوت در خور توجهی دارد.

اکنون واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم را روی توزیع تصادفی چشمه‌های حاضر در هر گروه

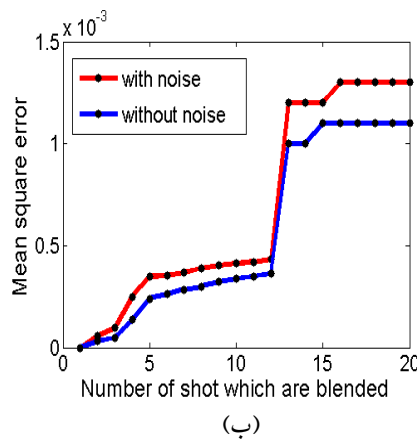
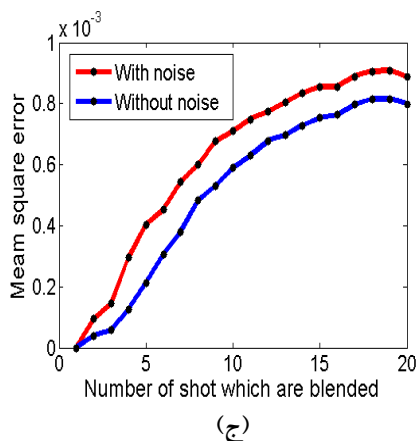
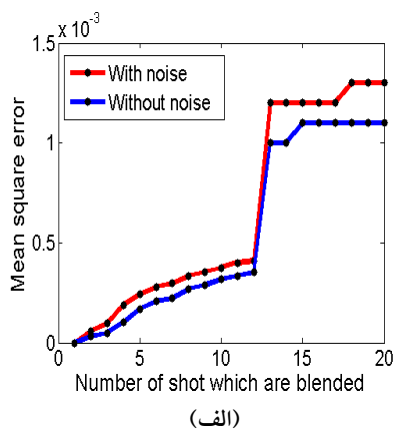
ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید خطا در نمودار شکل ۱۱-ج در مقایسه با شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب افزایش درخور ملاحظه‌ای یافته است. از طرفی از مقایسهٔ جبههٔ موج حاصل از وارون‌سازی مستقیم در شکل ۱۲-ج و جبههٔ موج اصلی در شکل ۱۲-د نتیجه می‌گیریم که طبق پیش‌بینی، روش وارون‌سازی مستقیم برای دادهٔ بدون محدودیت باند مکانی به ازای تمامی مقادیر n به‌خوبی جوابگو نیست.

مستقیم برای واترکیب استفاده کرد. اما به ازای $n \geq 12$ واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم جواب رضایت‌بخشی به ما نمی‌دهد.

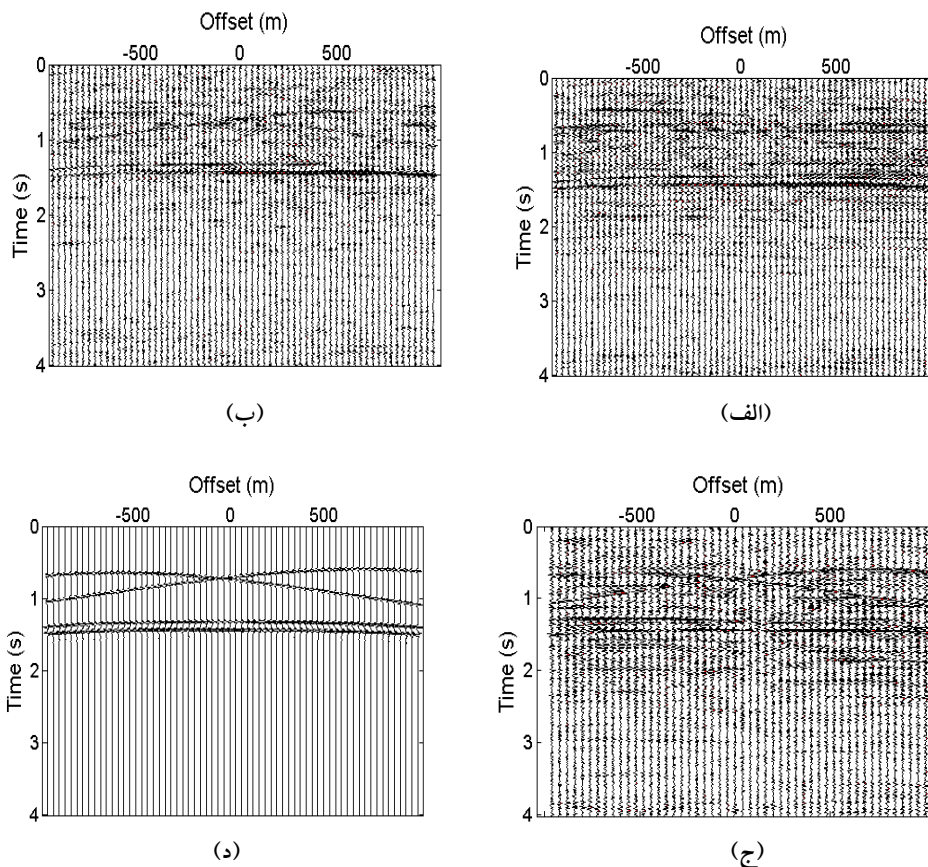
در اینجا به بررسی عملکرد واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم در برخورد با داده‌هایی می‌پردازیم که در راستای مکان دگرنام شده‌اند. برای ایجاد این داده از ۵۰ گیرنده به فاصلهٔ ۴۰ متر استفاده می‌شود. نمودار میانگین مربعات خطا برای $n=2$ تا $n=20$ در شکل ۱۱-



شکل ۱۰. ساختاری از تابع گسترش نقطه‌ای؛ (الف) باند عبور تابع گسترش نقطه‌ای پایه در حوزهٔ عدم‌موج-فرکانس و (ب) تابع گسترش نقطه‌ای در حوزهٔ مسافت-زمان.



شکل ۱۱. خطای ناشی از واترکیب اثر چشمه‌های همزمان مربوط به مدل شکل ۶ به روش وارون‌سازی مستقیم؛ (الف) برای چشمه‌های منظم (چشمه‌های حاضر در یک گروه مجاور یکدیگر باشند)، (ب) برای چشمه‌های تصادفی (چشمه‌های حاضر در یک گروه به‌صورت تصادفی از سطح داده‌برداری انتخاب شوند) و (ج) برای دادهٔ دارای دگرنامی مکانی.



شکل ۱۲. جبهه موج حاصل از واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم مربوط به چشمه میانی مدل شکل ۶؛ (الف) برای داده عددی باند محدود با توزیع منظم چشمه‌ها ($n=12$)، (ب) برای داده عددی باند محدود با توزیع تصادفی چشمه‌ها ($n=12$)، (ج) برای داده عددی بدون محدودیت باند مکانی و (د) برای جبهه موج اصلی حاصل از داده‌برداری متعارف.

۴.۱. تأثیر سطوح مختلف نوفه در واترکیب از طریق وارون‌سازی مستقیم در بخش ۴ و با توجه به نمودارهای شکل ۱۱ نشان داده شد که با افزایش چشمه‌های حاضر در گروه، خطا افزایش می‌یابد. در این بخش به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر سطوح مختلف نوفه در چگونگی عملکرد واترکیب در مدل شکل ۶، میانگین مربعات خطا را به ازای نسبت سیگنال به نوفه‌های مختلف و برای تعداد چشمه‌های متفاوت حاضر در گروه به دست می‌آوریم. جدول ۱ مقدار خطا در عملکرد منظم چشمه‌ها (چشمه‌های حاضر در یک گروه مجاور یکدیگر باشند) و جدول ۲ مقدار خطا در عملکرد تصادفی چشمه‌ها (چشمه‌های حاضر در یک گروه به صورت تصادفی از سطح داده‌برداری انتخاب شوند) را نشان می‌دهد. با توجه به سطرهای این جدول‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت سیگنال به نوفه (Signal-to-Noise)

۴.۲. چالش‌های استفاده از داده میدانی در بخش ۴ روش‌های واترکیب مطرح شده روی داده‌ای مصنوعی اعمال شد. اما داده‌برداری همزمان در عمل با رویدادهای ناخوشایندی روبه‌رو است که برخی نسبت سیگنال به نوفه و برخی دیگر همدوسی سیگنال را

عنوان نوفه‌های همدوس در نظر گرفته شده و در مراحل اولیه پردازش حذف می‌گردند. در داده‌برداری همزمان، امواج زمین‌غلت ایجادشده توسط چشمه‌های ترکیبی با یکدیگر و با بازتابنده‌ها تداخل می‌کنند. اما به دلیل خصوصیات فیزیکی ذکر شده از امواج زمین‌غلت، بخش بزرگی از انرژی این امواج خارج از پهنای باند داده‌برداری واقع می‌شود. بنابراین تفاوت اساسی بین تکنیک‌های تضعیف امواج زمین‌غلت در داده‌برداری همزمان و داده‌برداری مرسوم وجود ندارد.

نوفه‌های لرزه‌ای

به غیر از نوفه‌های ایجادشده توسط چشمه، در داده‌برداری همزمان به دلیل زمان کوتاه داده‌برداری نوفه‌های کمتری در مقایسه با داده‌برداری مرسوم ثبت می‌گردد. بنابراین، در داده‌برداری همزمان نسبت سیگنال به نوفه در مقایسه با داده‌برداری مرسوم بیشتر است. به عبارت دیگر، تأثیر نوفه‌های لرزه‌ای در واترکیب چندان پیچیده نیست. اگرچه تخمین دقیق تأثیر نوفه‌های لرزه‌ای در واترکیب دشوار به نظر می‌رسد اما به یقین می‌توان گفت که نسبت سیگنال به نوفه در نتایج حاصل از واترکیب در مقایسه با داده‌گیری مرسوم بزرگ‌تر یا مساوی است.

نوفه‌های پراکنده از کنار

نوفه‌های پراکنده از کنار در حقیقت نوفه‌های همدوسی هستند که در کف دریا یا جایی که توپوگرافی تخت و صافی ندارد و تغییرات نامنظم باعث پراش نقطه‌ای می‌شود، ایجاد می‌شوند. این زمان رسیده‌ها معمولاً هذلولی‌های فرکانس بالایی هستند که برونراند (Moveout) بالایی را نشان می‌دهند. در شکل ۷ نمونه‌ای از این پراشیدگی دیده می‌شود که ناشی از شکستگی لایه دوم در مدل شکل ۶ است. همچنین در شکل ۹ نشان داده شد که روش‌های واترکیب هیچ مشکلی در بازسازی این زمان رسیده‌ها ندارند. بنابراین، پیش‌بینی می‌شود که پس از جداسازی داده ترکیبی می‌توان با استفاده از روش‌های پردازشی معمول از جمله فیلتر شیب این دسته از نوفه‌ها را تضعیف کرد.

کاهش می‌دهند. در ادامه تأثیر این رویدادها در داده‌برداری همزمان بررسی می‌شود.

دگرنامی مکانی

یکی از چالش‌هایی که در واترکیب می‌تواند مشکل‌ساز شود، وجود دگرنامی مکانی در داده است؛ چرا که قید اصلی در واترکیب از طریق وارون‌سازی مستقیم استفاده از محدودیت باند مکانی داده لرزه‌ای است. خوشبختانه طراحی داده‌برداری همزمان به گونه‌ای است که دگرنامی مکانی را به حداقل می‌رساند. به عبارت دیگر، یکی از مزایای داده‌برداری همزمان در مقایسه با داده‌برداری مرسوم نمونه‌برداری متراکم چشمه‌ها (افزایش تعداد چشمه‌ها با حفظ زمان کل داده‌برداری) و نبود دگرنامی مکانی است.

پیچیدگی لایه‌های سطحی

پیچیدگی لایه‌های سطحی چالشی بزرگ در داده‌های خشکی است. این پیچیدگی تأثیر منفی در کیفیت و همدوسی سیگنال خواهد گذاشت. تکنیک‌های مبنایابی مجدد (Redatuming techniques) در از بین بردن این تأثیرات منفی کاربرد وسیعی دارند. تکنیک‌های مشابه نیز می‌تواند در فرایند واترکیب به منظور بهبود همدوسی سیگنال به کار برده شود. این تکنیک‌ها می‌تواند برای هر تأثیر ناخوشایند دیگری که موجب کاهش همدوسی سیگنال می‌شود، به کار برده شود.

تغییرات توپوگرافی سطحی

تغییرات توپوگرافی سطحی نیز از جمله چالش‌هایی است که در داده‌میدانی نباید نادیده گرفته شود. در این شرایط، قیدهای ترکیبی و منظم‌سازی وارون‌ماتریس گسترش نقطه‌ای به بررسی‌های بیشتری نیاز دارد که کار ساده‌ای به نظر نمی‌رسد و این مقاله می‌تواند نقطه شروع خوبی برای مطالعات آتی باشد.

امواج زمین‌غلت

امواج زمین‌غلت در حقیقت امواج ریلی هستند که در سطح آزاد منتشر می‌شوند. خطی بودن، فرکانس پایین، دامنه بالا و سرعت پایین این امواج آن‌ها را از رویدادهای بازتابی متمایز می‌کند. بنابراین، معمولاً به

جدول ۱. میانگین مربعات خطا به ازای نسبت سیگنال به نوفه‌های مختلف و تعداد چشمه‌های متفاوت حاضر در گروه در عملکرد منظم چشمه‌ها.

Signal-to-Noise Ratio Number of shot which are blended	SNR=1	SNR=5	SNR=10	SNR=15	SNR=20
n=2	$5/1823 \times 10^{-4}$	$2/312 \times 10^{-4}$	$1/0148 \times 10^{-4}$	$6/0317 \times 10^{-5}$	$4/7521 \times 10^{-5}$
n=3	$7/8467 \times 10^{-4}$	$3/4312 \times 10^{-4}$	$1/4389 \times 10^{-4}$	$8/3279 \times 10^{-5}$	$6/508 \times 10^{-5}$
n=4	$1/200 \times 10^{-3}$	$5/3779 \times 10^{-4}$	$2/2689 \times 10^{-4}$	$1/3652 \times 10^{-4}$	$1/125 \times 10^{-4}$
n=5	$1/2012 \times 10^{-3}$	$5/5262 \times 10^{-4}$	$2/4859 \times 10^{-4}$	$1/4356 \times 10^{-4}$	$1/1493 \times 10^{-4}$
n=6	$1/300 \times 10^{-3}$	$5/9577 \times 10^{-4}$	$2/7031 \times 10^{-4}$	$1/6784 \times 10^{-4}$	$1/3555 \times 10^{-4}$
n=7	$1/3032 \times 10^{-3}$	$5/9599 \times 10^{-4}$	$2/8525 \times 10^{-4}$	$1/9422 \times 10^{-4}$	$1/5978 \times 10^{-4}$
n=8	$1/3038 \times 10^{-3}$	$5/9601 \times 10^{-4}$	$2/9552 \times 10^{-4}$	$2/1100 \times 10^{-4}$	$1/8342 \times 10^{-4}$
n=9	$1/3045 \times 10^{-3}$	$5/9706 \times 10^{-4}$	$3/1278 \times 10^{-4}$	$2/3275 \times 10^{-4}$	$2/029 \times 10^{-4}$

جدول ۲. میانگین مربعات خطا به ازای نسبت سیگنال به نوفه‌های مختلف و تعداد چشمه‌های متفاوت حاضر در گروه در عملکرد تصادفی چشمه‌ها.

Signal-to-Noise Ratio Number of shot which are blended	SNR=1	SNR=5	SNR=10	SNR=15	SNR=20
n=2	$5/1968 \times 10^{-4}$	$2/3163 \times 10^{-4}$	$1/1430 \times 10^{-4}$	$6/9122 \times 10^{-5}$	$4/7613 \times 10^{-5}$
n=3	$8/2115 \times 10^{-4}$	$3/5811 \times 10^{-4}$	$1/5012 \times 10^{-4}$	$8/5199 \times 10^{-5}$	$6/5093 \times 10^{-5}$
n=4	$1/500 \times 10^{-3}$	$6/7531 \times 10^{-4}$	$3/0409 \times 10^{-4}$	$1/8696 \times 10^{-4}$	$1/450 \times 10^{-4}$
n=5	$1/5012 \times 10^{-3}$	$6/7611 \times 10^{-4}$	$3/8571 \times 10^{-4}$	$1/8754 \times 10^{-4}$	$1/5472 \times 10^{-4}$
n=6	$1/600 \times 10^{-3}$	$7/1665 \times 10^{-4}$	$3/8879 \times 10^{-4}$	$1/8840 \times 10^{-4}$	$1/5809 \times 10^{-4}$
n=7	$1/6001 \times 10^{-3}$	$7/8737 \times 10^{-4}$	$3/9232 \times 10^{-4}$	$2/0556 \times 10^{-4}$	$1/6944 \times 10^{-4}$
n=8	$1/6031 \times 10^{-3}$	$7/9833 \times 10^{-4}$	$3/9561 \times 10^{-4}$	$2/2408 \times 10^{-4}$	$1/9252 \times 10^{-4}$
n=9	$1/6045 \times 10^{-3}$	$7/9837 \times 10^{-4}$	$3/9563 \times 10^{-4}$	$2/5014 \times 10^{-4}$	$2/2004 \times 10^{-4}$

۵. بحث

ناخواسته را از بین نمی‌برد. ایجاد این نوفه‌های ناهمدوس ما را به اعمال تکنیک تضعیف نوفه از جمله فیلتر بردار میانه چندبعدی وادار ساخت.

این فیلتر به منظور دستیابی به خروجی بهینه در جهت‌های مختلف اعمال می‌شود و بنابراین از مشکلات ناشی از اعمال فیلتر میانی مرسوم در نواحی پرشیب

همان‌طور که اشاره شد حل مسئله واترکیب با استفاده از وارون‌سازی کمترین مربعات، معادل واترکیب کاذب است. این روش داده ترکیبی را باز و سیگنال‌ها را در حوزه مکان-زمان به موقعیت درست خودشان انتقال می‌دهد اما نوفه‌های ترکیبی از جمله سیگنال‌های

تضعیف خیزک‌های حاصل از حل کمترین مربعات استفاده می‌شود. این روش بر اساس توزیع پراکنده جبهه موج ترکیبی در رکوردهای هم‌میان نقطه عمل کرده و از یک مفهوم مقدار میانه چندبعدی استفاده می‌کند که برای تأخیرهای بزرگ کارایی خوبی دارد.

در روش سوم، برخلاف فیلتر بردار-میانه چندبعدی فرض‌های همدوسی و تنکی در نظر گرفته نمی‌شود و در عوض از قید محدودیت روی نمونه‌برداری چشمه استفاده می‌گردد. مثال‌های عددی نشان دادند که در واترکیب به روش وارون‌سازی مستقیم زمانی سیگنال‌های ناخواسته به‌خوبی تضعیف می‌شوند که داده ترکیبی شامل پاسخ چشمه‌های متراکم و مجاور باشد. بنابراین، قید محدودیت باند مکانی شرط لازم برای اعمال این روش است. با توجه به اینکه اعمال این روش نیازمند پاسخ چشمه‌های متراکم است، اعمال آن در داده‌برداری ترکیبی برای حالتی که به کیفیت بهتر داده نیاز است (در مقایسه با حالتی که به کاهش زمان داده‌برداری نیاز است) ترجیح داده می‌شود و این کار با افزودن چشمه‌های بیشتر بین چشمه‌های اولیه صورت می‌پذیرد. از طرفی محیط‌های ناهموار و موانع طبیعی ایجاد بی‌نظمی در فواصل جانبی بین چشمه‌ها و گیرنده‌ها را به همراه خواهند داشت که نتیجه آن به هم ریختگی ساختار نواری ماتریس گسترش نقطه‌ای Γ' است و بنابراین روش واترکیب مستقیم به‌خوبی جواب نمی‌دهد. در این شرایط، منظم‌سازی وارون ماتریس گسترش نقطه‌ای به بررسی‌های بیشتری نیاز دارد.

در نهایت با مقایسه جبهه موج حاصل از واترکیب در هر سه روش متوجه می‌شویم که واترکیب از هر روش ضعف‌های خاص خود را دارد، اما روش واترکیب از طریق منظم‌سازی ماتریس عملگر به دلیل دقت آن در تضعیف نوفه و حفظ سیگنال و همچنین سرعت بالای الگوریتم آن به دو روش دیگر ترجیح داده می‌شود.

مراجع

Akerberg, P., Hampson, G., Rickett, J., Martin, H. and Cole, J., 2008, Simultaneous source

رهایی می‌یابد. در این فیلتر، پارامترهای تغییرات شیب و شیب نمونه‌برداری تعداد جهت‌های مورد بررسی را تخمین می‌زنند. با تکرار و آزمایش روی داده ساختگی متوجه شدیم که تغییرات بزرگ با نمونه‌برداری متراکم، تضعیف بهتر نوفه‌ها را حاصل می‌کند که ناشی از محاسبات متمرکز است. طول بردار نیز انتخاب جهت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر طول بردار خیلی کوچک یا خیلی بزرگ باشد، باعث به هم ریختگی سیگنال ما می‌شود. در بیشتر مواقع، طول بردار بین نصف تا یک شکل موج را پوشش می‌دهد. افزایش طول بردار باعث تضعیف بهتر سیگنال‌های ناخواسته می‌گردد اما بخش‌های بیشتری از سیگنال همدوس مورد نظر را نیز تضعیف می‌کند. با توجه به دورافت ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر در شکل ۹-ب این تکنیک موجب به هم ریختگی و تضعیف بخشی از سیگنال‌های مورد نظر می‌گردد و نتیجه رضایت‌بخشی به ما نمی‌دهد. از طرفی با توجه به الگوریتم تکرارشونده در تکنیک‌های تضعیف نوفه، اعمال آن‌ها بسیار زمان‌بر است.

اما در واترکیب از طریق وارون‌سازی مستقیم ماتریس عملگر، یک فیلتر در واترکیب کاذب تعبیه می‌شود که از امتیاز محدودیت باند مکانی پاسخ لرزه‌ای بهره می‌برد. این فیلتر عملگر واترکیب کاذب را به عملگر واترکیب حقیقی تبدیل می‌کند که می‌تواند فقط سیگنال‌های ناخواسته را از بین ببرد؛ البته در این روش واترکیب نیز تمامی سیگنال‌های ناخواسته به‌طور کامل از بین نمی‌روند اما می‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، سه روش حل مسئله واترکیب بررسی می‌شود. در روش کمترین مربعات یا واترکیب کاذب سیگنال مورد نظر به لحاظ فازی اصلاح و تأخیر زمانی آن برداشته می‌شود اما سیگنال‌های ناخواسته مقداری فاز اضافی به دست می‌آورند که در تمام رکوردها به جز چشمه مشترک به‌صورت نوفه‌های ناهمدوس یا خیزک (Spike) ظاهر می‌شوند.

در روش دوم از فیلتر بردار-میانه چندبعدی برای

- separation by sparse Radon transform, 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2801-2805.
- Abma, R. L., Manning, T., Tanis, M., Yu, J. and Foster, M., 2010, High-quality separation of simultaneous sources by sparse inversion, 72nd Annual Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts, B003.
- Bagaini, C., 2006, Overview of simultaneous vibroseis acquisition methods, 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 70-74.
- Berkhout, A. J., 1982, Seismic migration, imaging of acoustic energy by wave field extrapolation, A. theoretical aspects: Elsevier. Berkhout, A. J., 2008, changing the mindset in seismic data acquisition, The Leading Edge, 27, 924-938.
- Garotta, R., 1983, Simultaneous recording of several vibroseis seismic lines, 53rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 308-310.
- Hampson, G., Stefani, J. and Herkenhoff, F., 2008, Acquisition using simultaneous sources, The Leading Edge, 27, 918-923.
- Ikelle, L., 2007, Coding and decoding: Seismic data modeling, acquisition and processing, 77th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 66-70.
- Liu, Y., Luo, Y. and Wang, Y., 2009, Vector median filter and its applications in geophysics, 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3342-3346.
- Mahdad, A., Doulgeris, P. and Blacquièrre, G., 2011, Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of blending interference noise, Geophysics, 76(3), Q9-Q17.
- Mansour, H., Wason, H., Lin, T. T. Y. and Herrmann, F. J., 2011, A compressive sensing perspective on simultaneous marine acquisition, 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, SBGf, Expanded Abstracts, SO-04.
- Menke, W., 1989, Geophysical data analysis, Academic Press.
- Neelamani, R., Krohn, C. E., Krebs, J. R., Romberg, J. K., Deffenbaugh, M. and Anderson, J. E., 2010, Efficient seismic forward modeling using simultaneous random sources and sparsity, Geophysics, 75(6), WB15-WB27.
- Shoudong H., Luo, Y. and Kelamis, P. G., 2012, Simultaneous sources separation via multidirectional vector-median filtering, Geophysics, 77, V123-V131.
- Silverman, D., 1979, Method of three dimensional seismic prospecting, US Patent., 4, 459-463.
- Wang, W., 2000, Coherent signal prediction using mid-value correlative filtering, Oil Geophysical Prospecting, 35, 273-282.
- Wapenaar, K., van der Neut, J., Ruigrok, E., Draganov, D., Hunziker, J., Slob, E., Thorbecke, J. and Snieder, R., 2011, Seismic interferometry by crosscorrelation and by multidimensional deconvolution: a systematic comparison, Geophysical Journal International, 185, 1335-1364.
- Wapenaar, K., van der Neut, J. and Thorbecke, J., 2012, Deblending by direct inversion, Geophysics, 77, 9-12.
- Wapenaar, K., van der Neut, J. and Thorbecke, J., 2012, On the relation between seismic interferometry and the simultaneous-source method, Geophysical Prospecting, 60, 802-823.
- Womack, J. E., Cruz, J. R., Rigdon, H. K. and Hoover, G. M., 1990, Encoding techniques for multiple source point seismic data acquisition, Geophysics, 55, 1389-1396.
- Zhang, R., and Ulrych, T. J., 2003, Multiple suppression based on the migration operator and a hyperbolic median filter, 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1949-1952.