

# استفاده از بُرداریهای پایه فوریه در الگوریتم تعقیب تطابق برای درون‌یابی داده لِرزه‌ای و بازسازی ردلرزه‌ها روی شبکه‌های منظم

صابر جهانجوی<sup>۱</sup>، رامین نیکروز<sup>۲\*</sup> و حمیدرضا سیاه‌کوهی<sup>۳</sup>

۱. مربی، گروه زمین‌شناسی نفت، دانشکده علوم، دانشگاه سوران، اربیل، عراق

۲. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ایران

۳. استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۸/۹، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

## چکیده

در اغلب مراحل پردازش داده‌های لرزه‌ای فرض بر یکنواخت بودن نمونه‌برداری زمانی و مکانی است. از این رو بازسازی داده‌های لرزه‌ای مفقود، درون‌یابی گاف بین ردلرزه‌ها و مرتب ساختن ردلرزه‌ها روی یک شبکه منظم و متراکم یکی از گام‌های مهم در فرایند پردازش داده‌های لرزه‌ای به‌منظور بالا بردن دقت و صحت مراحل بعدی پردازش است. اهمیت این موضوع سبب معرفی روش‌های زیادی در این زمینه شده است. ایده اصلی برخی از روش‌های درون‌یابی و بازسازی، پیدا کردن الگویی است که تغییرات داده را در حوزه اصلی داده و یا در حوزه یکی از تبدیل‌ها نشان دهد و از این الگو به‌منظور درون‌یابی داده در نقاط دلخواه استفاده شود. نمایش زمان‌بسامد داده‌های لرزه‌ای یکی از حوزه‌هایی است که تاکنون برای بررسی خواص ژئوفیزیکی ساختارها و مخازن مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق پس از بررسی مختصر الگوریتم تعقیب تطابق که یکی از روش‌های موجود برای یافتن توزیع زمان‌بسامد داده‌ها در علوم و مهندسی است، الگوریتمی برای بازسازی داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تعقیب تطابق و بُرداریهای پایه فوریه شرح داده شده است. نتایج به‌دست آمده از درون‌یابی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی و بازسازی آنها روی شبکه منظم، حاکی از توانایی روش معرفی شده در بازسازی ساختارهای پیچیده و شیب‌دار و افزایش دقت نتایج با افزایش بُدهای داده ورودی است.

واژه‌های کلیدی: تعقیب تطابق، تبدیل زمان‌بسامد، درون‌یابی، بازسازی، نمونه‌برداری نامنظم، تبدیل فوریه.

## ۱. مقدمه

پردازش لرزه‌ای، آن را درون‌یابی می‌کنند. این روش‌ها کاربر را قادر می‌سازد تا فرض‌ها و محدودیت‌های بیشتری را در جریان درون‌یابی و بازسازی بر داده اعمال کند و در نهایت نتیجه بازسازی دقیق‌تری به‌دست دهد. بسیاری از روش‌هایی که برای درون‌یابی داده‌های لرزه‌ای معرفی شده‌اند، محاسبات را روی شبکه‌های نمونه‌برداری منظم با تراکم کم یا دارای ردلرزه‌های مفقود و یا گاف‌های خالی عملی می‌سازند. این فرض ممکن است سبب ایجاد نوفه و یا رویدادهای نادرست در مقطع درون‌یابی شده شود (خو و همکاران، ۲۰۱۰). تاکنون کارهای زیادی برای بازسازی داده‌های با نمونه‌برداری تصادفی صورت گرفته است (کانینگ و گاردنر، ۱۹۹۶؛ زوارتس و ساشی، ۲۰۰۷؛ خو و

داده‌های لرزه‌ای در امتداد محور زمان منظم و به اندازه کافی متراکم‌اند و نیازی به درون‌یابی و بازسازی آنها در این راستا نیست. از طرف دیگر شرایط فوق در راستای محور مکان داده‌های لرزه‌ای وجود ندارد و همواره لازم است که برای به‌دست آمدن نتایج بهتر و قابل قبول از سایر مراحل پردازش لرزه‌ای داده‌ها در امتداد مکان درون‌یابی و روی شبکه‌ای منظم بازسازی شوند. خانک‌بندی (Binning) که ردلرزه‌ها را مستقیم یا با تغییرات اندک روی یک شبکه منظم منتقل می‌کند، در بسیاری از نرم‌افزارهای پردازش لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به علت انتقال بازتاب‌های لرزه‌ای به مکانی متفاوت می‌تواند سبب تولید خطا شود. روش‌های دیگری نیز موجودند که قبل از شروع

نشان می‌دهد که روش مورد بحث؛ که توانایی اعمال روی داده با شبکه نمونه برداری تصادفی، قابلیت حذف اثر دگرنامی و بازسازی رویدادهای دارای خمیدگی را دارد و همچنین داده‌های اصلی موجود را در مکان‌های نمونه برداری شده به صورت دقیق بازسازی می‌کند، شرایط لازم برای یک الگوریتم درون‌یابی دقیق را دارد.

## ۲. نظریه روش تعقیب تطابق

تعقیب تطابق (MP) الگوریتمی تکراری است که هر سیگنال را به صورت ترکیب خطی از شکل موج‌های پایه گوناگون تجزیه می‌کند. در هر تکرار، این امواج را از بین بانک جامعی (dictionary) از اتم‌های زمان‌بسامد به گونه‌ای انتخاب می‌کنند که بهترین تطابق را با شکل سیگنال داشته باشند. اصولاً این روش به منظور تبدیل زمان‌بسامد معرفی شده است و اگر بانک امواج از اتم‌های زمان‌بسامد نظیر تابع‌های گابور تشکیل شده باشد؛ که در آن هر کدام از اتم‌ها اتساع، انتقال و مدوله‌سازی یک تابع خاص به وجود آمده‌اند، الگوریتم تعقیب تطابق یک تبدیل بهینه زمان‌بسامدی را به دست می‌دهد.

## ۲.۱. تعقیب تطابق در فضای کامل

هر تابع  $f$  را در فضای هیلبرت  $H$  (که دارای تعداد نامتناهی بردارهای پایه  $D = (g_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$  است) می‌توان براساس تصویر آن در امتداد هر کدام از بردارهای پایه موجود در میدان تجزیه کرد (مالات و ژانگ، ۱۹۹۳):

$$f = \langle f, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + Rf, \quad (1)$$

که در آن،  $\langle f, g_{\gamma_0} \rangle$  نشان‌دهنده ضرب داخلی،  $\gamma \in \Gamma = R^+ \times R^2$  و  $Rf$  باقی‌مانده بردار  $f$  پس از تقریب آن در راستای  $g_{\gamma_0}$  است و  $\|g_{\gamma_0}\| = 1$ . واضح است که  $Rf$  هیچ مولفه‌ای در راستای  $g_{\gamma_0}$  ندارد. مجموعه بردارهای پایه که در اینجا اتم‌های زمان‌بسامدند به صورت رابطه (۲) قابل تعریف هستند:

$$g_\gamma(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{i\xi t}, \quad (2)$$

که در آن،  $s$  مقیاس،  $\xi$  مدوله‌سازی،  $u$  انتقال  $\gamma =$

همکاران، ۲۰۱۰). روش‌هایی که قابلیت اعمال بر شبکه‌های نامنظم دارند، داده‌های ورودی را تغییر می‌دهند (غیر از روش‌هایی که بعد از بازسازی، ردلرزه‌های موجود اولیه را دوباره جایگزین می‌کنند) و در مکان‌های نمونه برداری شده داده‌ها را به صورت دقیق بازسازی نمی‌کنند.

از طرف دیگر، تجزیه سیگنال به اتم‌های زمان‌بسامدی که در امتداد محورهای زمان و بسامد به خوبی متمرکز شده‌اند، با توجه به نوع اتم‌های زمان‌بسامد مورد استفاده، کاربرد فراوانی در پردازش سیگنال دارد. روش‌های زیادی برای این شیوه از تجزیه معرفی شده است. برای مثال تبدیل فوریه زمان کوتاه و تبدیل موجک (کوهن، ۱۹۸۹؛ ریول و وترلی، ۱۹۹۱)، در پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های پرکاربردی که برای تجزیه زمان‌بسامد معرفی شده است روش تعقیب تطابق (Matching Pursuit) (مالات و ژانگ، ۱۹۹۳) است. تابع‌های پایه متنوعی را می‌توان در حکم بردارهای پایه تعقیب تطابق به کار گرفت (استورم و گیسون، ۲۰۰۶). تاکنون در لرزه‌شناسی به منظور بازسازی داده با استفاده از تعقیب تطابق، از دونوع بردار پایه سینوسی و فوریه استفاده شده است (ازبک و همکاران، ۲۰۰۹، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲؛ واسالو و همکاران، ۲۰۱۰؛ گوئن و وینیت، ۲۰۱۱؛ هولاندر و همکاران، ۲۰۱۲). علاوه بر این بسیاری دیگر از تابع‌های پایه نظیر کرولت، کریپلت، ساینز و مانند آن را نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد.

در این مقاله پس از مرور روابط تعقیب تطابق با اتم‌های زمان‌بسامد گابور (که معمولاً برای یافتن توزیع زمان‌بسامد سیگنال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند)، محاسبات مربوط به تعقیب تطابق روی تابع‌های نمای فوریه شرح داده شده و برخلاف کاربرد رایج آن برای تبدیل زمان‌بسامد، از تعقیب تطابق برای درون‌یابی و بازسازی داده‌های لرزه‌ای دوبعدی و چندبُعدی استفاده می‌شود. نتایج حاصل روی داده‌های مصنوعی و واقعی

کرات از یک عنصر استفاده کرد و در نتیجه خطای تقریب نیز زیاد خواهد بود. هرچه بانک عنصرهای پایه جامع تر باشد، ضریب‌های به دست آمده تنک تر و تقریب دقیق تر خواهد بود. نوع عنصرهای موجود در بانک اتم‌ها باید با دقت انتخاب شود زیرا ممکن است نتیجه نهایی را تحت تأثیر قرار دهد (استورم و گیسون، ۲۰۰۶). از طرف دیگر گسترده بودن بانک بردارهای پایه، سبب افزایش و پیچیدگی محاسبات می‌شود. لذا انتخاب بانک اتم‌های پایه باید به نحوی صورت گیرد که بین دقت مورد نظر در نتایج و تعداد محاسبات مورد نیاز تعادل برقرار شود (لیو و همکاران، ۲۰۰۴).

اتم‌های زمان بسامد گابور (شکل ۱) گزینه مناسبی برای استفاده در بانک اتم‌های پایه روش تعقیب تطابق هستند. علاوه بر این، نمونه‌های بسیار دیگری از تابع‌های پایه نظیر کرولت، کریپلت، سائزلت و مانند آن را می‌توان در تعقیب تطابق مورد استفاده قرار داد. برای بازسازی و درونیابی داده‌های لرزه‌ای تا زمانی که استفاده از تمرکز زمانی بسامدهای داده ورودی مورد نیاز نباشد، تابع‌هایی مانند بردارهای پایه سینوسی، گزینه مناسبی برای استفاده در الگوریتم تعقیب تطابق و یافتن محتوی بسامدی داده هستند (ازبک و همکاران، ۲۰۰۹). استفاده از بردارهای پایه سینوسی در هر تکرار نیازمند محاسبه یک دوره‌نگار لامب-اسکارگل (لامب، ۱۹۷۶) است. از آنجا که تعقیب تطابق به صورت تکراری، در هر مرحله نتیجه این روش را بهبود می‌بخشد، طیف به دست آمده از الگوریتم تعقیب تطابق به مراتب دقیق تر از دوره‌نگار اولیه خواهد بود (جهانجوی، ۱۳۹۱).

$(s, u, \xi)$  و  $\frac{1}{\sqrt{s}}$  نرم  $g_{\gamma}(t)$  را به ۱ بهنجار می‌کند. اگر  $g_{\gamma_0}$  به گونه‌ای انتخاب شود که اندازه تصویر  $f$  در راستای آن بزرگ تر از اندازه تصویر  $f$  در راستای سایر بردارهای پایه  $g_{\gamma}$  باشد،  $\|Rf\|^2$  کمینه مقدار را خواهد داشت. از آنجا که  $g_{\gamma_0}$  بر  $Rf$  عمود است و لذا می‌توان نوشت:

$$| \langle f, g_{\gamma_0} \rangle | \geq \alpha \sup_{\gamma \in \Gamma} | \langle f, g_{\gamma} \rangle |, \quad (3)$$

$$0 < \alpha \leq 1$$

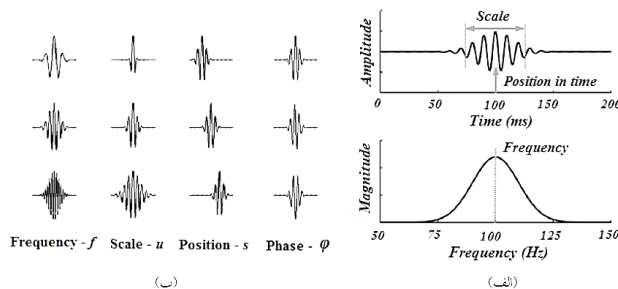
تعقیب تطابق الگوریتمی است تکراری و همان‌طور که در بالا برای  $f$  گفته شد، باقی‌مانده  $Rf$  را نیز با تصویر کردن آن روی بردارهای موجود در  $D$  تجزیه می‌کند. این روند هر بار برای بردار باقی‌مانده‌ای که به دست می‌آید تکرار می‌شود و در آخر می‌توان  $f$  را به صورت مجموعی از تصویرهای آن در راستای بردارهای پایه تصویر کرد (رابطه ۴). می‌توان ثابت کرد که تعقیب تطابق همگرا است و باقی‌مانده همواره به سمت صفر میل می‌کند (مالات و ژانگ، ۱۹۹۳).

$$f = \sum_{n=0}^{+\infty} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n}, \quad (4)$$

در عمل تعداد عضوهای مجموعه بردارهای پایه محدود است و همچنین الگوریتم تعقیب تطابق به تعداد تکرارهای کمی اجرا می‌شود. در این حالت مجموع فوق تا مقدار مشخصی محاسبه می‌شود:

$$f = \sum_{n=0}^{m-1} \langle R^n f, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^m f, \quad (5)$$

مجموع فوق  $f$  را به صورت تقریبی و با خطای  $R^m f$  بازسازی می‌کند. اگر بانک عنصرهای پایه مورد استفاده، محدود و تعداد بردارهای پایه بسیار کم باشد، لازم است برای بسط یک سیگنال روی این بانک، به



شکل ۱. نمایش شکل اتم‌های زمان بسامد گابور و پارامترهای آن، (الف) یک اتم زمان بسامد گابور (بالا) و پوش آن (پایین)، (ب) تغییر شکل اتم‌های زمان بسامد گابور با تغییر در متغیرهای آن، هر ستون از (ب) تغییر اتم را با یک واحد تغییر در متغیر مربوط نشان می‌دهد (اقتباس از ژو و همکاران، ۲۰۰۷).

تفاضل بردار  $f$  و تصویر متعامد آن در راستای  $\varphi_{p_0}$  به دست می آید:

$$R^1 f = f - \langle f, \varphi_{p_0} \rangle \varphi_{p_0}, \quad (10)$$

با تکرار الگوریتم تعقیب تطابق،  $R^2 f$  حاصل می شود. به همین ترتیب الگوریتم تعقیب تطابق تا رسیدن به خطای مورد نظر ( $\|R^m f\| \leq \varepsilon$ ) ادامه می یابد.

$$R^{m+1} f = R^m f - \langle R^m f, \varphi_{p_0} \rangle \varphi_{p_0}, \quad (11)$$

بانک اتم های  $\varphi_k$  که از بردارهای پایه  $\frac{1}{\sqrt{N_p}} e^{2\pi i k x_l}$  تشکیل شده است که با توجه به رابطه (۷) بسامد  $k$  در بازه  $[-N_k/2, N_k/2]$  قرار دارد؛ به گونه ای که اختلاف هر دو بسامد متوالی یک واحد است. نمونه برداری بیشتر (*over-sampling*) در بازه فوق سبب افزایش تعداد بسامدهای مورد استفاده و در نتیجه افزایش تعداد بردارهای موجود در بانک اتم های پایه می شود. همان گونه که در بخش ۲-۱ اشاره شد، جامع تر شدن بانک اتم های پایه بر محاسبات تأثیر می گذارد و نتایج تکرارهای تعقیب تطابق دقیق تر خواهد شد.

### ۲.۳. تعقیب تطابق متعامد

در صورت اعمال روند فوق، ممکن است هر کدام از بردارهای پایه چندبار انتخاب شوند، این روش را تعقیب ساده یا بنیادی (*Basic Pursuit*) می نامند. اگر در الگوریتم تعقیب تطابق، باقی مانده همواره بر بردارهای انتخاب شده در مراحل قبل از خود عمود باشد (*Orthogonal Pursuit*)، هیچ کدام از بردارهای پایه مجدداً انتخاب نمی شود، در نتیجه الگوریتم سریع تر همگرا می شود و جواب دقیق تر خواهد بود (تروپ و گیلبرت، ۲۰۰۷). کونیس و راوهوت، (۲۰۰۷). برای ایجاد چنین شرایطی در تکرار  $m$  از الگوریتم تعقیب تطابق، برداری که بهترین تطابق را با باقی مانده دارد ( $g_{\gamma_{p_l}}$ )، به دست می آوریم، سپس همه بردارهای انتخاب شده قبلی با استفاده از کمینه کردن رابطه (۱۲) با روش کمترین مربعات، مجدداً بازسازی می شوند و به دست می آید. (هولاندر و همکاران، ۲۰۱۲).

۲.۲. تعقیب تطابق با استفاده از بردارهای پایه فوریه بانک بردارهای پایه در الگوریتم تعقیب تطابق را می توان از بردارهای پایه فوریه تشکیل داد. برای شرح چگونگی اعمال تعقیب تطابق روی این گونه تابع های،  $f(x)$  را در نظر می گیریم که در فاصله  $0 \leq x_l < 1, 1 \leq l \leq N_p$  در  $N_p$  نقطه  $x_l$  نمونه برداری شده است.  $f(x)$  بر حسب بردارهای پایه با رابطه (۶) بسط داده می شود:

$$f(x) = \sum_k a_k g(k), \quad (6)$$

اگر  $a_k$  را ضریب های فوریه سیگنال  $\hat{f}(k)$  و  $g(k)$  را بردارهای نمایی  $e^{2\pi i k x}$  در نظر بگیریم، می توان رابطه (۶) را به صورت رابطه (۷) بازنویسی کرد:

$$f(x_l) = \sum_{k=-N_k/2}^{N_k/2} \hat{f}(k) e^{2\pi i k x_l}, \quad (7)$$

رابطه فوق  $f(x_l)$  به طول  $N_p$  را به صورت مجموع  $N_k$  تابع فوریه  $e^{2\pi i k x_l}$  نشان می دهد. هدف ما یافتن ضریب های  $\hat{f}(k)$  است، به نحوی که مجموع  $N_k$  تابع پایه مختلط در  $x_l$  برابر  $f(x_l)$  شود. مولفه های  $f(x_l)$  با بردار ستونی  $f$  به طول  $N_p$  و تعداد  $N_k$  مولفه بسامدی  $\hat{f}(k)$  را با  $\hat{f}$  و تابع موج نمایی (بردار پایه) با بسامد  $k$  در نقطه  $x_l$  را با  $\varphi_k$  نمایش می دهیم.  $\varphi_k$  برابر با  $\frac{1}{\sqrt{N_p}} e^{2\pi i k x_l}$  است که در آن ضریب  $\frac{1}{\sqrt{N_p}}$  بردار  $\varphi_k$  را به ۱ بهنجار می کند. ماتریس  $\Phi$  با اندازه  $N_p \times N_k$  را نیز با استفاده از بردارهای  $\varphi_k$  در حکم ستون های ماتریس، تشکیل می دهیم. با استفاده از نماد گذاری ماتریسی، می توان رابطه (۷) را بازنویسی کرد:

$$f = \sqrt{N_p} \Phi \hat{f}, \quad (8)$$

اگر  $N_k > N_p$  دستگاه معادله های رابطه (۸) نامعین خواهد بود. برای حل این دستگاه نامعین از تعقیب تطابق استفاده می کنیم. در ابتدا با استفاده از رابطه (۳) از بین بانک بردارهای  $\varphi_k$ ، اندیس  $p_0$  را که به ازای آن  $\varphi_{p_0}$  بهترین تطابق را با  $f$  دارد پیدا می کنیم.

$$|\langle f, \varphi_{p_0} \rangle| \geq |\langle f, \varphi_k \rangle|, \quad (9)$$

$$-N_k/2 \leq k < N_k/2.$$

پس از یافتن  $\varphi_{p_0}$ ، مطابق با رابطه (۱) باقی مانده  $R^1 f$  از

۳- ضریب فوریه انتخاب شده در مرحله ۲ به بردار بسامد مکانی مرحله ۱ اضافه می شود.

۴- تصویر بردار باقی مانده در راستای بردار انتخاب شده از باقی مانده کسر می شود (رابطه ۱۱).

۵- با افزایش  $m$  به اندازه یک واحد، مراحل ۲ تا ۴ تا زمانی که نرم بردار باقی مانده بیشتر از  $\varepsilon$  باشد تکرار می شود.

پس از آن که بسامدهای مکانی موجود در داده با استفاده از الگوریتم فوق تجزیه شدند، می توان با استفاده از بردارهای پایه انتخاب شده، برش بسامد زمانی  $f_s$  را روی شبکه نمونه برداری مکانی دلخواه بازسازی کرد. با اعمال الگوریتم روی همه بسامدهای زمانی و انتقال داده به دست آمده از حوزه  $f-x$  به حوزه  $t-x$  داده لرزه ای روی شبکه نمونه برداری مورد نظر بازسازی می شود.

به علت تنگ بودن بسامدهای غالب موجود در داده، می توان در هر تکرار فرایند تعقیب تطابق بنیادی، هم زمان چند بردار پایه را انتخاب کرد. این کار اگرچه سبب سرعت بخشیدن به روش و افزایش سرعت همگرایی باقی مانده می شود ولی در این حالت باقی مانده نهایی به عدد بزرگ تری همگرا می شود و ممکن است از دقت نتایج نهایی بکاهد (ازبک و همکاران، ۲۰۰۹). در عمل انتخاب محتاطانه و هم زمان تعدادی محدود از بردارهای پایه، موجب همگرایی سریع تر الگوریتم می شود در حالی که تاثیر محسوسی بر نتایج نهایی ندارد.

یکی از مسئله هایی که داده های لرزه ای را تحت تاثیر قرار می دهد دگرنامی است. در اینجا نیز بعد از استفاده از بردارهای پایه فوریه، بسامدهای بالاتر، دگرنام می شوند. استفاده از یک ماسک ضد دگرنامی که با استفاده از بسامدهای کم و دگرنام نشده تولید می شود، می تواند اثر دگرنامی را حذف کند. برای این منظور، قبل از شروع تعقیب تطابق با برون یابی طیف فوریه بسامدهای کم و دگرنام نشده یک ماسک برای وزن دادن به انرژی دگرنام نشده تولید می شود و در هر تکرار بردار پایه پس از وزن دادن ضریب های داخلی با استفاده

(۱۲)  $E = \sum_{l=1}^N [f(t_i) - \sum_{l=1}^m \langle R^m f, g_{\gamma_{pl}} \rangle g_{\gamma_{pl}}]^2$ ، با استفاده از بردارهای بازسازی شده  $(g'_{\gamma_{pl}})$  باقی مانده دوباره محاسبه می شود:

$$R^{m+1}f = f - \sum_{l=1}^m \langle R^m f, g'_{\gamma_{pl}} \rangle g'_{\gamma_{pl}} \quad (13)$$

باقی مانده ای که بدین صورت به دست می آید بر همه بردارهای پایه انتخاب شده عمود است و تصویر آن در امتداد این بردارها صفر خواهد بود. اگر  $\Phi$  ماتریس ساخته شده از بردارهای پایه تا مرحله  $m$  باشد (بردارها ستون های ماتریس اند)، با استفاده از روابط ماتریسی، دو رابطه اخیر را می توان با روابط (۱۴) و (۱۵) نمایش داد (تروپ و گیلبرت، ۲۰۰۷):

$$P = \Phi(\Phi^* \Phi)^{-1} \Phi^* \quad (14)$$

$$R^{m+1}f = (I - P)R^m f \quad (15)$$

### ۳. تعقیب تطابق و بازسازی داده های لرزه ای

روندی که در بخش های قبل شرح داده شد قادر است هر سیگنالی را بدون توجه به منظم بودن نمونه برداری آن، به بردارهای موجود در بانک اتم های پایه تجزیه کند. با در اختیار داشتن توزیع مکانی و یا محتوای بسامدی حاصل از تعقیب تطابق می توان سیگنال را روی هر شبکه دلخواه منظم و یا نامنظم بازسازی کرد. از طرف دیگر داده های لرزه ای دارای دو یا چند بعد هستند که در امتداد محور زمان نیازی به بازسازی ندارند. برای درون یابی داده لرزه ای دوبعدی با استفاده از تعقیب تطابق، ابتدا داده ها به حوزه  $f-x$  انتقال می یابند و سپس الگوریتم  $MP$  به طور جداگانه روی همه بسامدهای زمانی موجود در داده  $(f_s)$  به صورت زیر اعمال می شود:

۱- کمترین مقدار مورد دلخواهی برای اندازه بردار باقی مانده در حکم آستانه خطا ( $\varepsilon$ ) در نظر گرفته می شود،  $m=0$  بردار بسامدهای مکانی برابر صفر و بردار باقی مانده برابر سطر بسامد  $f_s$  از ماتریس داده در حوزه  $f-x$  قرار داده می شود.

۲- با استفاده از رابطه (۹) اندیس ضریب فوریه ای که بیشترین تطابق را با بردار باقی مانده دارد پیدا می شود.

از ماسک ضد دگرنامی انتخاب می‌شود (اشنوبیل و همکاران، ۲۰۰۹).

برای داده‌های با بُعدهای بیشتر که در آنها متغیرهای  $\vec{x}_l$  و  $\vec{k}$  هر کدام بردارهایی چندمولفه‌ای هستند، رابطه (۷) قابل بازنویسی به صورت برداری است:

$$f(\vec{x}_l) = \sum_k \hat{f}(\vec{k}) e^{2\pi i \vec{k} \cdot \vec{x}_l}, \quad (16)$$

این رابطه همان عکس تبدیل فوری چندبُعدی است و می‌توان آن را به جای رابطه (۷) در مورد داده‌های چندبُعدی بکار گرفت (هولندر و همکاران، ۲۰۱۲). هرچه اطلاعات ورودی در الگوریتم درونیابی و بازسازی بیشتر باشد، نتیجه بازسازی بهتر خواهد بود. معمولاً داده‌هایی که در یک بُعد تُنک و دگرنام‌شده‌اند، در بُعد دیگر متراکم‌تر هستند و لذا می‌توان از اطلاعات هر بُعد برای بازسازی بُعدهای دیگر استفاده کرد. این امر برای مولفه‌های داده لرزه‌ای نیز صادق است و اگر گیرنده‌ها امواج لرزه‌ای را در امتدادهای گوناگون ثبت کنند، علی‌رغم افزایش هزینه داده‌برداری، نتیجه پردازش لرزه‌ای بهتر خواهد شد (واسالو و همکاران، ۲۰۱۰).

در صورت استفاده از بردارهای پایه فوری، الگوریتم تعقیب تطابق برای بازسازی داده‌های لرزه‌ای با الگوریتم تبدیل فوری ضدنشست *ALFT* (جهانجوی و همکاران، ۱۳۹۲) شباهت پیدا می‌کند. هر دو روش با انتخاب بهینه ضریب‌های فوری، طیف فوری داده ناکامل را بازسازی می‌کنند و از آن برای بازسازی سیگنال در حوزه مکان بهره می‌گیرند. با وجود این به علت تفاوت در منطق انتخاب کردن ضریب‌ها در هر تکرار، دخالت دادن مکان نمونه‌برداری و تابع وزن مکان در *ALFT* و همچنین امکان استفاده هم‌زمان از بردارهای پایه غیر از ضریب‌های فوری در *MP* انرژی باقی‌مانده و سرعت همگرایی این دو روش تفاوت خواهند داشت (گوئن و وینیت، ۲۰۱۱). شباهت دو الگوریتم سبب می‌شود که بتوان از روش‌های سرعت بخشیدن و کاهش محاسبات تبدیل‌های فوری بهینه (جهانجوی و همکاران، ۲۰۱۶)

برای تسریع *MP* نیز استفاده کرد.

بیشترین محاسبات لازم برای یک سیگنال یک‌بُعدی در هنگام تولید ضریب‌های فوری برای انتخاب بزرگ‌ترین مقدار آنها است. لذا با صرف نظر کردن از عملیات جمع و اندیس‌دهی در برابر عملیات ضرب که به مراتب کندتر اجرا می‌شود، محاسبات لازم در هر مرحله از تعقیب تطابق یک سیگنال یک‌بُعدی از مرتبه  $N_k * N_p$  است. این بدان معنی است که با فرض اینکه تعداد تکرارهای تعقیب تطابق برای بازسازی سیگنال برابر با  $N_p$  باشد، کل محاسبات موردنیاز برای بازسازی سیگنال یک‌بُعدی از مرتبه  $N_k^2 * N_p$  و با فرض نزدیک بودن  $N_k$  و  $N_p$  از مرتبه  $N_k^3$  است. آن‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش اندک در اندازه سیگنال و یا مولفه‌های بسامدی مورد استفاده، آهنگ افزایش تعداد محاسبات موردنیاز به مراتب افزایش پیدا می‌کند. لذا آن‌گونه که از روش‌های تکرارشونده انتظار می‌رود، علی‌رغم دقت و صحت نتایج تعقیب تطابق، این روش بسیار زمان‌بر است. استفاده از بانک جامع‌تر از اتم‌های پایه تا اندازه‌ای سبب کاهش تکرارهای موردنیاز و در نتیجه کاهش محاسبات می‌شود. یکی از روش‌های کاهش محاسبات، استفاده از ماتریس تسریع الگوریتم‌های تکرارشونده فوری است (جهانجوی و همکاران، ۲۰۱۶). در هنگام استفاده از ماتریس تسریع که به علت متقارن بودن آن با محاسبات کم ساخته می‌شود، پس از اولین تکرار دیگر نیازی به محاسبه دوباره ضریب‌ها نخواهد بود. به عبارت دیگر با تقریبات صورت گرفته در بالا و با در نظر داشتن اینکه فقط یک بار ضریب‌های فوری محاسبه می‌شوند، تعداد محاسبات از مرتبه  $N_k^2$  خواهد بود. ستون دوم جدول ۱ تعداد تقریبی محاسبات را برای سیگنال فرضی یک‌بُعدی در هنگام استفاده از ماتریس تسریع برای تعداد مولفه بسامدی ستون اول نشان می‌دهد. مقایسه ستون دو و سه از جدول ۱ حاکی از کاهش چشمگیر تعداد محاسبات است. اهمیت کاهش تعداد محاسبات برای داده‌های چندبُعدی لرزه‌ای بیشتر نمایان است. با توجه به اینکه الگوریتم بازسازی با استفاده از تعقیب تطابق روی برش‌های بسامد زمانی از داده اعمال می‌شود و با تقریب

(شکل ۳-الف) نشان‌دهنده پیچیدگی محتوای بسامدی داده است. اگرچه اعمال یک فیلتر باندگذر قبل از اجرای پردازش‌های لرزه‌ای به بیشتر شدن کیفیت نتایج کمک می‌کند، در اینجا برای مشاهده کارایی روش از اعمال فیلتر میان‌گذر در امتداد محور زمان اجتناب شده است. از آنجا که در زمان استفاده از ضریب‌های فوریه در حکم بردارهای پایه  $MP$  فرض بر خطی بودن رویدادها است، در این مثال مقطع لرزه‌ای به پنجره‌های کوچک‌تری از ۱۵ ردلرزه مجاور با همپوشانی ۲ ردلرزه تقسیم شد. با استفاده از  $MP$  همه ردلرزه‌های موجود و مفقود روی شبکه‌ای منظم دوباره بازسازی شد (شکل ۲-ب).

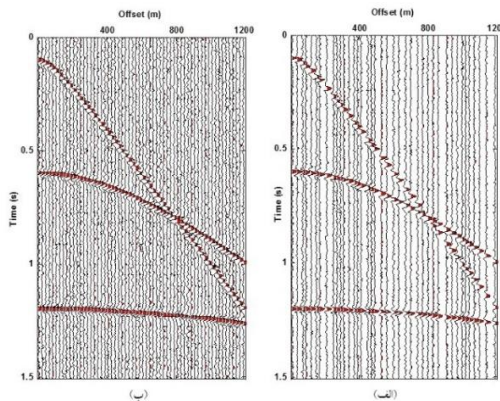
ردلرزه‌های بازسازی شده از ردلرزه‌های موجود با دقت زیادی با ردلرزه‌های اصلی برابرند. گاف‌ها و ردلرزه‌های مفقود نیز به صورت قابل‌قبولی همراه با مقدار قابل چشم‌پوشی نوبه حاصل از نوبه موجود در داده و تقریب‌های صورت گرفته برای تکرارهای الگوریتم، بازسازی شده‌اند. شکل ۳-ب طیف دامنه ردلرزه بازسازی شده از ردلرزه مفقود انتخاب شده را نشان می‌دهد. انرژی سیگنال تقریباً ثابت مانده است اما محتوای بسامدی ردلرزه به‌ویژه در بسامدهای بالاتر به‌طور نامحسوسی تغییر کرده است که با توجه به میزان نوبه موجود و خمیدگی رویدادها دور از انتظار نیست. منشأ اصلی خطا در اینجا خمیدگی رویدادها است که علی‌رغم پنجره کردن داده به وجود آمده است. در صورت وجود خمیدگی زیاد و گاف‌های بسیار بزرگ، استفاده از سایر بدهای داده مانند مختصات چشمه، مختصات نوبه و سمت (آزموت)، دقت نتایج را بالا می‌برد.

شکل ۴ یک ساختار فرضی حاوی سه رویداد متقاطع با شیب‌های متفاوت را نشان می‌دهد. مجموعه سه‌بعدی از ردلرزه‌های مصنوعی با زمان سیر دوطرفه روی این ساختار تولید شده است. ردلرزه‌ها روی یک شبکه نامنظم نمونه‌برداری به دست آمده‌اند (شکل ۵-الف). هدف بازسازی ردلرزه‌ها روی یک شبکه برداشت متراکم با نمونه‌برداری منظم است.

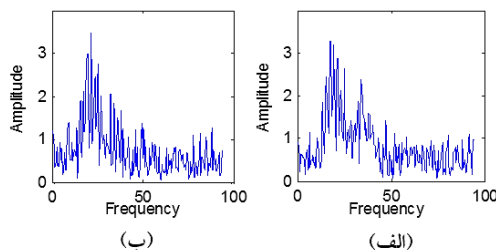
اینکه تعداد کل بسامدهای مکانی یک داده  $n$  بعدی در راستای تمام محورها با یکدیگر و با اندازه نقطه‌های موجود برابر باشد، مجموع محاسبات برای بازسازی داده‌ای که دارای ۱۰۰ بسامد زمانی است به صورت تقریبی برابر با  $100 * (N_k)^{n+2}$  است. با در نظر گرفتن اینکه ماتریس تسریعی که در ابتدا تولید می‌شود برای همه بسامدهای زمانی قابل استفاده است (جهانجوی و همکاران، ۲۰۱۶) این روش تعداد محاسبات را به  $(N_k)^{n+1}$  کاهش می‌دهد. در جدول ۱ تعداد محاسبات لازم برای بازسازی با تعقیب تطابق معمولی و در هنگام استفاده از ماتریس تسریع برای داده سه‌بعدی فرضی حاوی ۱۰۰ بسامد زمانی و به‌زای مقادیر متفاوت بسامد مکانی در دو راستای موجود درج شده است. مشاهده می‌شود ماتریس تسریع تعداد محاسبات را برای داده سه‌بعدی به صورت چشمگیری کاهش می‌دهد.

#### ۴. کاربرد تعقیب تطابق برای درون‌یابی و بازسازی داده‌های لرزه‌ای

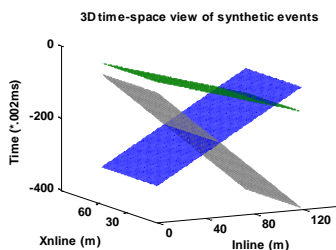
برای مشاهده کارایی روش  $MP$  در درون‌یابی داده‌های لرزه‌ای، از این روش به منظور بازسازی ردلرزه‌های مصنوعی و واقعی استفاده شد. بانک اتم‌های پایه از بردارهای  $\phi_k$  با سه برابر نمونه‌برداری (*over-sampling*) در حوزه بسامد مکانی انتخاب شده است. شکل ۲-الف یک ثبت نقطه میانی مشترک مصنوعی حاوی سه رویداد با سرعت و عمق‌های متفاوت و دارای نوبه را نشان می‌دهد. یک سوم از ردلرزه‌های این ثبت که با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر قرار دارند به صورت تصادفی حذف شده‌اند. دیده می‌شود که علاوه بر ردلرزه‌های خالی، گاف‌های کوچک و بزرگ نیز در داده به وجود آمده است. بزرگ‌ترین گاف با چهار برابر فاصله ردلرزه‌های مجاور در شبکه بازسازی و مجاور محل تقاطع دو رویداد قرار دارد. به علاوه چندین گاف با دو و سه برابر این فاصله نیز وجود دارد. رویدادها هم در نقاطی که شیب کم دارند و هم در نقاط با شیب زیاد بریده شده‌اند. طیف دامنه یکی از ردلرزه‌های حذف شده که در نزدیکی نقطه تقاطع دو رویداد بالایی قرار دارد



شکل ۲. بازسازی ردلرزه‌های مفقود یک ثبت نقطه‌مییانی مشترک مصنوعی. (الف) ردلرزه‌ها با فاصله ۱۰ متر نسبت به هم قرار دارند. یک‌سوم ردلرزه‌ها به‌صورت تصادفی حذف شده‌اند. (ب) مقطع حاصل از بازسازی با استفاده از *MP* به‌منظور تسهیل در مشاهده، ردلرزه‌ها یک‌درمیان نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. طیف دامنه ردلرزه با دورافت ۸۷۰ متر در ثبت نقطه‌مییانی مشترک شکل ۲. (الف) طیف دامنه ردلرزه مفقود. (ب) طیف دامنه ردلرزه بازسازی شده. انرژی سیگنال تقریباً حفظ شده‌است درحالی‌که محتوای بسامدی برای بسامدهای بزرگ‌تر به‌طور نامحسوسی تغییر کرده‌است.



شکل ۴. مدل زمین فرضی حاوی سه بازتابنده متقاطع با شیب‌های گوناگون که داده لرزه‌ای مصنوعی روی آن تولید شده است.

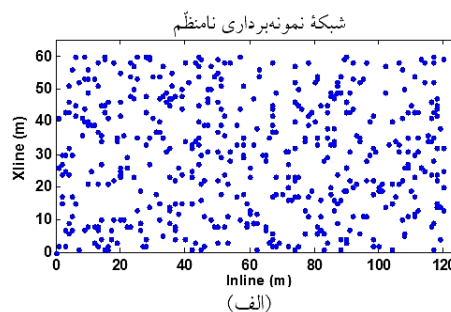
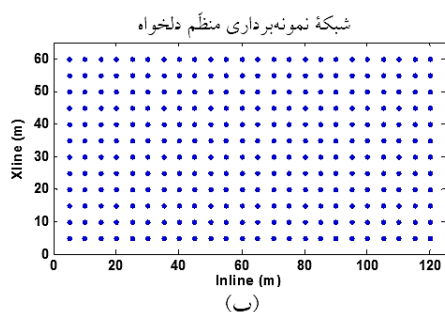
جدول ۱. نرخ افزایش محاسبات در بازسازی یک سیگنال یک‌بعدی و سه‌بعدی با الگوریتم عادی تعقیب تطابق و در زمان استفاده از ماتریس تسریع در الگوریتم تعقیب تطابق

تعداد مولفه‌های بسامد مکانی مورد استفاده	تعداد تقریبی محاسبات تعقیب تطابق معمولی برای سیگنال فرضی یک‌بعدی	تعداد تقریبی محاسبات تعقیب تطابق معمولی برای داده لرزه‌ای فرضی سه‌بعدی با ۱۰۰ بسامد زمانی	تعداد تقریبی محاسبات تعقیب تطابق با استفاده از ماتریس تسریع برای سیگنال فرضی یک‌بعدی	تعداد تقریبی محاسبات تعقیب تطابق با استفاده از ماتریس تسریع برای سیگنال فرضی سه‌بعدی با ۱۰۰ بسامد زمانی
$N_k$	$N_k^3$	$N_k^2$	$N_k^3$	$100 * (N_k)^5$
۵	۱۲۵	۲۵	۶۲۵	۳۱۲۵۰۰
۱۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰
۱۵	۳۳۷۵	۲۲۵	۵۰۶۲۵	۷۵۹۳۷۵۰۰
۲۰	۸۰۰۰	۴۰۰	۱۶۰۰۰۰	۳۲۰۰۰۰۰۰
۲۵	۱۵۶۲۵	۶۲۵	۳۹۰۶۲۵	۹۷۶۵۶۲۵۰۰
۵۰	۱۲۵۰۰۰	۲۵۰۰	۶۲۵۰۰۰۰	۳۱۲۵۰۰۰۰۰۰

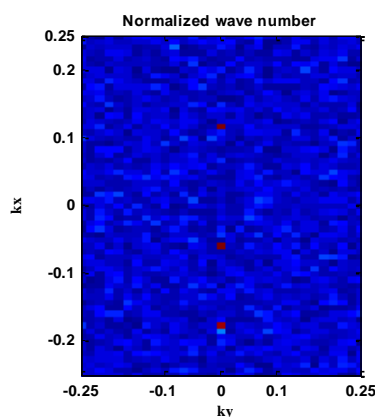
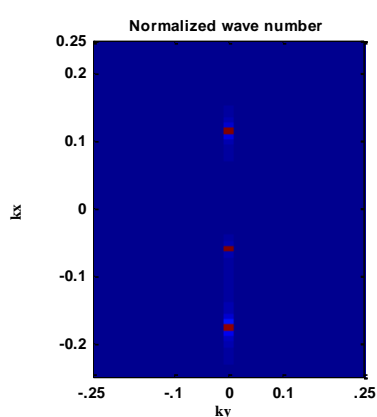


الف). با انتخاب بُردار پایه‌ای که بیشترین مطابقت را با داده دارد و کم کردن تصویر داده در راستای این بُردار پایه، الگوریتم روی داده باقی‌مانده تکرار می‌شود. در آخر، بُردارهای پایه انتخابی پیرامون چند ضریب فوریه مرتبط با رویدادهای موجود (در این مثال سه رویداد) همگرا می‌شود (شکل ۶-ب). با به دست آمدن بُردارهای پایه می‌توان داده را روی هر شبکه دلخواه بازسازی کرد. در اینجا  $MP$  داده نامنظم پیش‌گفته را روی شبکه منظم و متراکمی از خانک‌ها به ابعاد  $5 \times 5$  متر بازسازی کرده‌است (شکل ۵-ب).

پس از اعمال تبدیل فوریه در امتداد زمان روی ردلرزه‌های موجود، تعقیب تطابق به صورت جداگانه روی هر کدام از برش‌های بسامدی اعمال می‌شود. هر چند پنجره کردن داده‌های ورودی باعث برقراری شرط خطی بودن رویدادها و کاهش تعداد محاسبات کل می‌شود، در اینجا به علت خطی بودن رویدادهای مدل و نبود نوفه، کل مکعب داده نامنظم به یکباره در حکم ورودی الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته‌است. در اولین تکرار از تعقیب تطابق به علت نامنظم بودن شبکه برداشت، داده موجود در راستای همه بُردارهای پایه فوریه دارای مقادیر قابل توجهی است (شکل ۶-



شکل ۵. شبکه نمونه برداری داده‌های لرزه‌ای مصنوعی روی ساختار فرضی نشان داده شده در شکل ۴ (الف). شبکه کاملاً تصادفی اولیه. بیشتر مراحل پردازش لرزه‌ای نمی‌توانند روی چنین داده‌ای اعمال شوند و یا نتیجه درستی به دست نمی‌دهند. (ب) شبکه نمونه برداری منظم با خانک‌بندی منظم و متراکم.



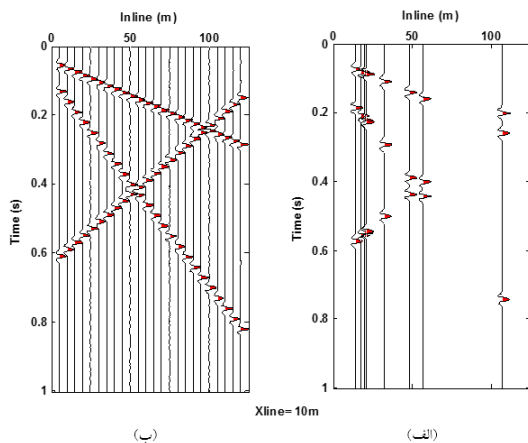
شکل ۶. بُردارهای پایه بُرش بسامد زمانی ۳۰ هرتز از ردلرزه‌های سه‌بعدی مدل نشان داده شده در شکل ۴ (الف) در اولین تکرار  $MP$  در راستای همه بُردارهای پایه فوریه موجود دارای مؤلفه است. (ب) در خاتمه بُردارهای انتخاب شده پیرامون سه بُردار بسامد مکانی همگرا می‌شوند.

شکل ۷ یک مقطع به خط (*In-line*) از داده مصنوعی فوق را قبل و بعد از بازسازی نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، ردلرزه‌هایی که در مکان‌های نمونه‌برداری دوباره بازسازی شده‌اند با ردلرزه‌های اصلی مطابقت دارند. این امر روش درون‌یابی با تعقیب تطابق را از بسیاری دیگر از روش‌های موجود متمایز می‌سازد. برای سهولت در مشاهده میزان نوفه‌ای که ممکن است *MP* تولید کند از داده مصنوعی اولیه، نوفه‌ای وارد نکرده‌ایم. گاف‌های بزرگ موجود به‌طور قابل‌قبولی درون‌یابی شده‌اند و مقدار نوفه تولیدی بسیار کم است. اگر درون‌یابی به‌صورت دوبعدی صورت گیرد، خطای درون‌یابی برای چنین گافی بیشتر خواهد بود. استفاده از بُعدهای بیشتر سبب می‌شود که بتوان از اطلاعات سایر بُعدها نیز برای فرایند پردازشی یک بُعد خاص کمک گرفت.

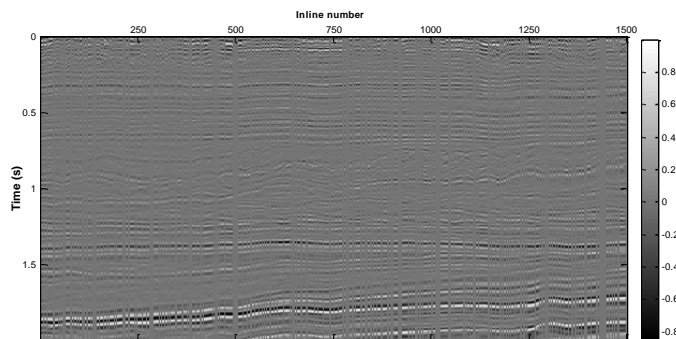
برش به‌خطی از یک داده لرزه‌ای واقعی دارای ۱۵۰۰ ردلرزه که یک‌سوم از آنها به‌صورت تصادفی حذف شده‌اند در شکل ۸ نشان داده شده است. وجود گاف‌های بزرگ، نسبت نوفه زیاد و رویدادهای شیب‌دار بازسازی ردلرزه‌های مفقود را دشوار می‌سازد. با تقسیم کردن داده روی پنجره‌هایی از ۱۵ ردلرزه مجاور *MP* به‌صورت دوبعدی روی برش‌های بسامدی از مقطع اعمال و نتیجه بازسازی در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف طیف دامنه ردلرزه‌ای را قبل از حذف شدن و در محدوده‌ای با نمونه‌برداری تُنک را نشان می‌دهد (ردلرزه ۱۳۸۶). بسامدهای ردلرزه بازسازی شده در این محل به‌طور کلی با ردلرزه اصلی تطابق دارد. برخلاف مثال مصنوعی اول در اینجا نوفه با بسامد زیاد فیلتر شده و نتایج بهتری به‌دست آمده است. با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود که رویدادهای موجود در ردلرزه‌های بازسازی شده با رویدادهای اصلی تا اندازه قابل‌قبولی همخوانی دارند. با اینکه در اینجا هدف بازسازی ردلرزه‌های مفقود بود، به‌علت

افزایش دقت و انرژی بسامدهای سیگنال موجود در مقابل انرژی نوفه (مانند آنچه در شکل ۱۰ با رنگ سرخ مشخص شده‌است)، نسبت سیگنال به نوفه و پیوستگی رویدادها در مقطع بازسازی شده افزایش یافته است. گاف‌های کوچک و بزرگ از ردلرزه‌های مفقود به‌خوبی بازسازی شده‌اند. نکته قابل توجه این است که در این نقاط رویدادهای بازسازی شده تقریباً به‌صورت خطی رویدادهای مربوط در ردلرزه‌های اصلی را به یکدیگر متصل می‌سازند. لذا اگر قبلاً در محل گاف‌های بسیار بزرگ ناپیوستگی و یا بی‌هنجاری وجود داشته باشد روش‌های درون‌یابی آنها را بازسازی نمی‌کنند. باید یادآوری کرد که روش‌های پردازش لرزه‌ای، اطلاعاتی را که در زمان برداشت وارد داده نشده است تولید نمی‌کنند و بهترین راه، برداشت بیشتر با در نظر گرفتن هزینه‌های آن است.

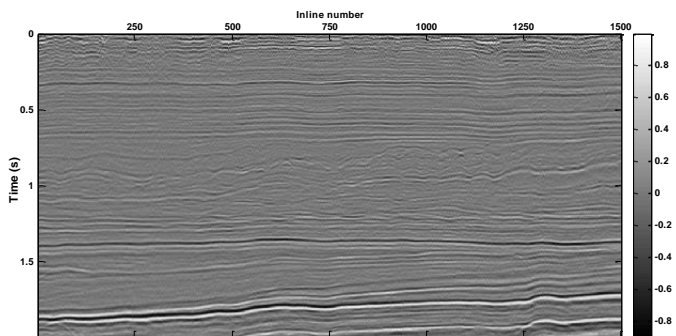
در ظاهر هرچه مقدار آستانه خطا ( $\epsilon$ ) کوچک‌تر باشد انرژی بازتاب بهتر بازسازی شده است و نتیجه دقیق‌تر خواهد بود اما علی‌رغم اینکه دقت نرم‌افزاری رایانه و برنامه مورد استفاده محدود است، در زمانی که اندازه بردار باقی‌مانده کمتر می‌شود، سرعت همگرایی نیز به‌شدت کاهش می‌یابد و تعداد تکرارهای بیشتر تأثیر محسوسی در کاهش اندازه بردار باقی‌مانده نخواهد داشت. از طرف دیگر به‌علت وجود نوفه در داده و تقریب در محاسبات از طرف کاربر یا نرم‌افزار، بردار باقی‌مانده به مقداری غیر از صفر همگرا می‌شود (ازبک و همکاران، ۲۰۰۹). در مثال‌هایی این مقاله  $\epsilon$  از درجه ۵- ۱۰ انتخاب شده است. از آنجا که معمولاً بردار باقی‌مانده بعد از چند تکرار همگرا می‌شود (کمتر از ۱۰ تکرار در داده‌های مصنوعی بدون نوفه و کمتر از ۱۰۰ تکرار در داده‌های واقعی) می‌توان به‌جای در نظر گرفتن آستانه خطا، الگوریتم را بعد از چند تکرار از پیش تعیین شده نیز قطع کرد.



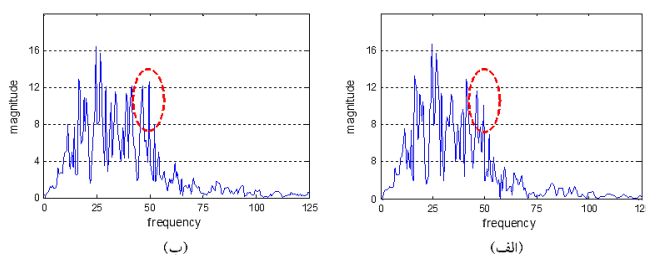
شکل ۷. یک بُرش به خط از داده سه بُعدی مصنوعی حاصل از ساختار مدل نشان داده شده در شکل ۴ قبل (الف) و بعد (ب) از بازسازی آن روی شبکه منظم نمونه برداری شکل ۵ با استفاده از *MP* ردلزه های اصلی بدون نوفه، گاف و ردلزه های خالی با نوفه بسیار کمی بازسازی شده است.



شکل ۸. مقطع به خط از یک داده لرزه ای با ۱۵۰۰ ردلزه که ۶۰۰ ردلزه آن به صورت تصادفی حذف شده است. نسبت نوفه زیاد، گاف های بزرگ و رویدادهای شیب دار و دارای خمیدگی، بازسازی ردلزه های مفقود از این مقطع دوبعدی را تحت تأثیر قرار می دهد.



شکل ۹. مقطع شکل ۸ بعد از درون یابی با الگوریتم *MP* و بازسازی ۶۰۰ ردلزه جدید. ۹۰۰ ردلزه اولیه در مکان خود و ردلزه های مفقود و گاف های موجود در فضای بین ردلزه های اصلی درون یابی شده است.



شکل ۱۰. (الف) طیف دامنه ردلزه ۱۳۸۶ در شکل ۸ قبل از حذف شدن. (ب) طیف دامنه ردلزه ۱۳۸۶ در شکل ۸ بعد از بازسازی

## ۵. نتیجه گیری

علاوه بر کاربرد رایج تعقیب تطابق برای تجزیه زمان بسامد می توان آن را برای بازسازی داده های لرزه ای نیز به کار گرفت. تاکنون در بانک اتم های پایه تعقیب تطابق از تابع های سینوسی و ضرب های فوریه برای بازسازی داده های لرزه ای استفاده شده است ولی به صورت نظری و به خصوص برای بازسازی داده های لرزه ای که دامنه رویدادها در آنها نایب است و در امتداد مکان تغییر می کند، سایر موجک ها را نیز می توان مورد استفاده قرار داد.

در این مقاله از بردارهای پایه فوریه در الگوریتم تعقیب تطابق برای درون یابی و بازسازی داده های لرزه ای استفاده شد. در روش تعقیب تطابق مبتنی بر بردارهای پایه فوریه همانند سایر روش های بازسازی فوریه، فرض اصلی بر تئک بودن محتوی بسامدی و خطی بودن رویدادها است. لذا برای برقرار بودن فرض فوق لازم است که داده به روش پنجره زنی (*windowing*) به بخش های کوچک تری تقسیم شود. استفاده از یک ماسک ضددگرنامی و وزن دادن به بردارهای پایه ای که دگرنام نشده اند تاثیر پدیدۀ دگرنامی را کاهش می دهد.

میزان دقت نتایج درون یابی به میزان نامنظم بودن شبکه برداشت و مقدار آستانه در نظر گرفته شده برای خطا یا تعداد تکرارهای در نظر گرفته شده برای قطع الگوریتم بستگی دارد. هرچه تعداد بردارهای پایه موجود در محاسبات بیشتر و جامع تر باشد، الگوریتم سریع تر همگرا می شود و نتایج دقیق تر خواهد بود؛ ولی محاسبات هر تکرار بیشتر خواهد شد. هر چند نامنظم بودن بیشتر شبکه برداشت سبب می شود که تعداد

Conference & Exhibition incorporating Copenhagen, Denmark.

Jahanjooy, S., Nikrouz, R. and Mohammed, N., 2016, A faster method to reconstruct seismic data using anti-leakage Fourier transform, *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(1), 86-95.

Kunis, S. and Rauhut, H., 2007, *Random*

تکرارهای لازم برای رسیدن به آستانه خطا بیشتر شود، در دو مثال آخر که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت با وجود نامنظم و تئک بودن زیاد شبکه برداشت، نتایج قابل قبولی حاصل شد. در ثبت بازسازی شده با وجود تولید مقداری نوفه تصادفی در ردلرزه های جدید به علت خطای محاسبات و تقریب های در نظر گرفته شده، ردلرزه های اصلی به خوبی بازسازی شده اند و دامنه و محتوی بسامدی آنها حفظ شده است. مثال مصنوعی دوم روشن ساخت که همانند سایر مراحل پردازش لرزه ای، استفاده از بدهای بیشتر، کیفیت نتایج درون یابی و بازسازی را افزایش می دهد.

تعقیب تطابق روشی تکراری و با محاسبات زیاد است. استفاده از روند تعقیب تطابق متعامد به رغم افزایش محاسبات هر تکرار سبب کاهش تعداد تکرارهای لازم می شود. انتخاب محتاطانه چند بردار پایه هم زمان با توجه به تعداد رویدادها موجود در داده و مقدار نوفه آن نیز تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به مقدار آستانه را (در ازای کاهش نامحسوس دقت نتایج) کمتر می سازد. با استفاده از روش های تسریع در محاسبات، تبدیلات فوریه بهینه در الگوریتم تعقیب تطابق محاسبات این روش به مراتب کاهش می یابد.

## مراجع

جهانجوی، ص.، ۱۳۹۱، درون یابی رکورد لرزه ای بروش تبدیل فوریه ضدنشست و تعقیب تطابق، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه.

جهانجوی، ص.، سیاه کوهی، ح. ر. و نیکروز، ر.، ۱۳۹۲، تبدیل فوریه ضدنشست (ALFT) و کاربرد آن برای بازسازی داده های لرزه ای، م. فیزیک زمین و

فضا، ۳۹(۴)، ۴۵-۶۰.

Canning, A. and Gardner, H. F. G., 1996, Regularizing 3-D data sets with DMO, *Geophysics*, 61(4), 1103-1114.

Cohen, L., 1989, Time-frequency distributions: a review, *Proc. IEEE*, 77, 941-979.

Hollander, Y., Kosloff, D., Koren, Z. and Bartana, A., 2012, Seismic data interpolation by orthogonal matching pursuit, 74<sup>th</sup> EAGE

- sampling of sparse trigonometric polynomials II - orthogonal matching pursuit versus basis pursuit: foundations of computational mathematics, 8(6), 737-763.
- Liu, Q., Wang, Q. and Wu, L., 2004, Size of the dictionary in matching pursuit algorithm, *IEEE Transactions on signal processing*, 52(12), 3403-3408.
- Lomb, N. R., 1976, Least squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophysics and Space Science*, 39, 447-462.
- Mallat, S. and Zhang, Z., 1993, Matching pursuits with time-frequency dictionaries, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41, 3397-3415.
- Nguyen, T. and Winnett, R., 2011, Seismic interpolation by optimally matched Fourier components, *SEG San Antonio 2011 Annual Meeting, Expanded abstracts*, 3085-3089.
- Özbek, A., Özdemir, A. K. and Vassallo, M., 2009, Interpolation by matching pursuit, 79<sup>th</sup> Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 3254-3258.
- Özbek, A., Vassallo, M., Özdemir, K., van Manen, D.J., Eggenberger, K. and Robertsson, J.O.A., 2011, Parametric matching pursuit methods to reconstruct seismic data acquired with multichannel sampling, 73<sup>th</sup> EAGE conference and exhibition, Vienna, Austria.
- Özbek, A., Vassallo, M. and Özdemir, A. K., 2012, On the role of priors in generalized matching pursuit to reconstruct wavefields from multicomponent streamer data, 74<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition incorporating Copenhagen, Denmark.
- Rioul, O. and Vetterli, M., 1991, Wavelets and signal processing, *IEEE Signal Processing Magazine*, Oct. 1991.
- Schonewille, M., Klaedtke, A., Vigner, A., Brittain, J. and Martin, T., 2009, Seismic data regularization with the antialias antileakage Fourier transform, *First Break*, 27(09), 85-92.
- Sturm, B. L. and Gibson, J. D., 2006, Matching pursuit decomposition of non-noisy speech signals using several dictionaries, Research supported in part by NSF grants No. DGE-0221713 (IGERT in Interactive Digital Multimedia) and No. CCF-0429884.
- Tropp, J. A. and Gilbert, A. C., 2007, Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, *IEEE Transaction of information theory*, 53(12), 4655-4666.
- Vassallo, M., Ozbek, A., Özdemir, K. and Eggenberger, K., 2010, Crosline wavefield reconstruction from multi-component streamer data, *Multichannel interpolation by matching pursuit*, SEG Denver Annual Meeting.
- Xu, S., Zhang, Y., Pham, D. and Lambaré, G., 2010, Antileakage Fourier transform for seismic data regularization in higher dimension, *Geophysics*, 75, WB113-WB120.
- Zhou, W., Rangaswamy, N., Ktonas, P. and Frishman, L. J., 2007, Oscillatory potentials of the slow-sequence multifocal ERG in primates extracted using the Matching Pursuit method, Elsevier, *Vision Research* 47, 2021-2036.
- Zwartjes, P. M. and Sacchi, M. D., 2007, Fourier reconstruction of non-uniformly sampled, aliased seismic data, *Geophysics*, 72, V21-V32.

## Using Fourier based vectors in Matching Pursuit (MP) algorithm to interpolate seismic data and reconstruct traces on uniform grids

Jahanjouy, S.<sup>1</sup>, Nikrouz, R.<sup>2\*</sup> and Siahkoochi, H. R.<sup>3</sup>

1. Instructor, Department of Petroleum Geoscience, Faculty of Science, Soran University, Arbil, Iraq

2. Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Iran

3. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 31 Oct 2015, Accepted: 18 Oct 2016)

### Summary

Many steps of seismic data processing sequence suppose that data sets are sampled in time and spatial dimensions uniformly. Today, this assumption is true but only in time dimension. Modern seismic exploration equipment permits seismic data sets to be sampled uniformly and densely in time dimension. However, along spatial dimension uniform and dense sampling are not possible because of operating constraints, failure of equipment, topography conditions or commercial problems. It has been proved that the results of most of seismic data processing techniques are dependent on regularity, adequate sampling and density of input data sets. The fact that we need to interpolate seismic data sets causes several new-born approaches in this field. In most of the available seismic processing software, this task is done by 'binning' the data. This operation is one of the error sources of seismic sections. Moreover, there are some other different computational techniques to interpolate and reconstruct seismic data on a regular grid. Some of these approaches reconstruct seismic data at the given points using physical concepts of wave propagation and solving Kirchhoff's formula. In spite of practicability of these methods, need of initial accurate information about velocity model, geological property and high computational efforts restrict the domain of operation for these methods. Nowadays various mathematical methods are provided using the design of prediction filters, mathematical transformation and some other methods use rank reduction of data matrix to interpolate seismic data. According to their utilized assumptions, computational cost, noise, sampling type, and density of input data, each of these methods have their own constraints in performance and artifacts in final results which should be recognized. In science and engineering branches, a well-known algorithm that deals with signals is Matching Pursuit (MP). Originally, MP has been introduced to time-frequency transformation and finding the frequency content of signals. This transformation represents a signal as a linear composition of vectors that are available in a complete bank of time-frequency atoms (also called Dictionary). MP is an iterative algorithm that at each iteration finds a base vector in the dictionary that best matches to the signal, then subtracts the image of signal along this vector from the signal and updates the signal. This process will be continued until the remained signal is negligible. Originally, to have a good decomposition, this dictionary should contain a vast amount and kinds of wavelets like Gabor functions that each has its own dilation, modulation and translation. Heretofore MP is used to produce a single frequency seismic attribute in geophysics. For seismic data reconstruction and interpolation purposes, sine functions are applied as base vectors. The process of interpolation by MP that uses sine functions needs to solve a Lomb-Scargle periodogram at each iteration that may need to have many computations. Due the lots of works that have been done on this subject, today multi-dimension and multi-component seismic data set can be interpolated using sine functions at MP. Other functions that can be used as MP's base vectors are Fourier coefficients. Here, after some brief explanation about MP's algorithm and formulations we use Fourier coefficients as the base vectors of MP, interpolate and reconstruct some synthetic and real two and three dimensional seismic data. Despite of some random noises that are due to calculation and other estimations, the traces are reproduced acceptably. The results show that amplitude and frequency contents of events are well preserved. The noticeable point is that the traces that reproduced at original sampling points are nearly identical to original traces. This property and ability to interpolate data with completely non-uniform sampling grid separates Fourier MP from many of previous interpolation methods. Cautiously picking of several base function simultaneously is proposed to reduce needed iterations and speed up the algorithm. Windowing the input data and using an antialiasing mask are proposed to achieve the assumption of sparse frequency content and linearity of events and remove aliasing effects.

**Keywords:** Matching Pursuit, Time-frequency Transform, Interpolation, Reconstruction, Non-uniform sampling, Fourier transform.