

## جداسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده در داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم با استفاده از تجزیه مقدار تکین

احسان ذبیحی نائینی<sup>۱</sup>، امین روشندل کاهو<sup>۱</sup> و حمیدرضا سیاهکوهی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۴/۱۱/۱۱، پذیرش نهایی: ۸۵/۶/۲۸)

### چکیده

جداسازی امواج پایین‌رونده و بالارونده از یکدیگر، در تفسیر داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این مقاله با استفاده از تعلق ویژه‌تصویر از روش تجزیه مقدار تکین برای جداسازی امواج پایین‌رونده و بالارونده از یکدیگر استفاده شده و نتایج، با روش  $f-k$  در مورد داده‌های مصنوعی و واقعی مقایسه شده‌اند.

استفاده از روش فوریه دوبعدی  $f-k$  برای این منظور نیازمند نمونه‌برداری یکنواخت در زمان و مکان است. در استفاده از روش فیلتر میانه برای تفکیک امواج بالارونده و پایین‌رونده از هم، لازم است یکی از رویدادها با دقت خوبی به خط شوند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از اعمال روش تجزیه مقدار تکین بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی، می‌توان بیان کرد که روش تجزیه مقدار تکین به‌خاطر نیاز نداشتن به نمونه‌برداری منظم و به خط شدگی دقیق، ترجیح داده می‌شود. همچنین با توجه به مبانی نظری ویژه‌تصویرها، تضعیف نوفه به‌طور خودکار در حین اجرای پردازش از دیگر مزایای این روش است. شایان ذکر است که نگارندگان، نرم‌افزار لازم برای این مطالعه را تدوین کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مقدار تکین، ویژه‌تصویر، امواج بالارونده، امواج پایین‌رونده

### ۱ مقدمه

کاربرد روش پروفیل لرزه‌ای قائم در عملیات لرزه‌ای به مثابه ابزاری برای تعیین ضرایب بازتاب، شناسایی بازتابنده‌های لرزه‌ای، ساخت ردلرزه در محل چاه و مقایسه آن با داده‌های لرزه‌نگاری سطحی و لرزه‌نگاشت مصنوعی، مطالعه خواص فیزیکی سنگ‌ها و تضعیف امواج تکراری، مشخص کردن گسل‌ها و غیره شناخته شده است (هاردج، ۲۰۰۰ و کسل، ۱۹۸۴). یک بخش ضروری پردازش داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم، جداسازی امواج پایین‌رونده از بالارونده‌ها است که با توجه به دامنه کم امواج بالارونده با مشکل مواجه می‌شود. چنین مرحله پردازشی از آنجا اهمیت پیدا کرده است که مقدمه ساخت ردلرزه در محل چاه با استفاده از داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم و مقایسه آن با داده‌های لرزه‌نگاری

سطحی است (هاردج، ۲۰۰۰). یک روش ملموس برای جداسازی این دو مؤلفه موج، استفاده از اختلاف در سرعت فاز ظاهری آنها و فیلتر سرعت یا  $f-k$  است (ترتیل و همکاران، ۱۹۶۷ و سوپراجیتنو و گرین‌هالوک، ۱۹۸۵). از معایب این روش نیاز به نمونه‌برداری منظم در امتداد محور زمان و دورافت است. روش دیگر که از فیلتر میانه استفاده می‌کند، نیاز به اندازه‌گیری دقیق زمان اولین رسید دارد (هاردج، ۲۰۰۰). این مقاله مسئله را از دیدگاه دیگری که نیاز به نمونه‌برداری منظم در امتداد زمان و دورافت و اندازه‌گیری دقیق زمان اولین رسید ندارد، مورد بررسی قرار می‌دهد. این روش بر اساس تجزیه مقدار تکین (SVD) ماتریس داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم که شیفت

$$X^T X v_i = \eta_i^2 v_i \quad (۴)$$

$\Lambda$  یک ماتریس قطری  $N \times M$  با مقادیر تکین  $\lambda_i = +\sqrt{\eta_i^2}$  در امتداد قطر است. رابطه (۲) را می توان به صورت رابطه (۵) بازنویسی کرد.

$$X = \sum_{i=1}^r \lambda_i u_i v_i^T \quad (۵)$$

که در آن،  $r$  نشان دهنده مرتبه (Rank) ماتریس است. فاکتور  $u_i v_i^T$  یک ماتریس  $M \times N$  با مرتبه واحد است که ویژه تصویر (eigenimage)  $i$  ام ماتریس  $X$  نامیده می شود (آندرس و هانت، ۱۹۷۷). همان طور که از رابطه (۵) دیده می شود، سهم بازسازی  $X$  از ویژه تصویر متناظر یک مقدار تکین خاص با اندازه آن مقدار تکین متناسب است. از آنجا که مقادیر تکین به ترتیب بزرگی منظم شده اند، بزرگ ترین سهم در بازسازی  $X$  در چند ویژه تصویر اول نهفته است.

برای ماتریس  $X$  که نشان دهنده مقطع لرزه ای است، همه  $M$  ردلرزه ها مستقل خطی بوده و هیچ ردلرزه ای را نمی توان به صورت ترکیب خطی  $M-1$  ردلرزه دیگر نوشت، در چنین حالتی  $X$  دارای مرتبه کامل  $M$  بوده و همه  $\lambda_i$  ها مخالف صفرند. بنابراین بازسازی کامل  $X$  نیازمند همه ویژه تصویرها است.

از طرف دیگر در حالتی که همه  $M$  ردلرزه ها مضربی از یکدیگر باشند، همه ردلرزه ها وابسته خطی اند، مرتبه  $X$  برابر یک است و به طور کامل با ویژه تصویر اول مرتبه  $\lambda_1 u_1 v_1^T$  بازسازی می شود. در حالت کلی بسته به وابستگی خطی که بین ردلرزه ها وجود دارد  $X$  را می توان از چند ویژه تصویر اول بازسازی کرد.

### ۳ کاربرد SVD در VSP

داده های VSP پردازش نشده به واسطه مشکلات متعدد به طور خام قابل تفسیر نیست و نیازمند پردازش های خاص

زمانی استاتیکی به آنها اعمال شده کار می کند. در مقطع پردازش شده حاصل از SVD نه تنها امواج پایین رونده و بالارونده به خوبی از یکدیگر جدا شده اند بلکه نسبت سیگنال به نوفه مقطع حاصل نیز افزایش یافته است.

### ۲ تجزیه مقدار تکین (SVD)

روش تبدیل جزء اصلی (principal component transformation) به شکل های متفاوت در پردازش داده های لرزه ای به کار رفته و نتایج مطلوبی از آن حاصل شده است (جونز، ۱۹۸۵؛ همون و ماک، ۱۹۷۸ و سیاهکوهی، ۱۳۷۹).

SVD روش تبدیل جزء اصلی را از دیدگاه دیگری بررسی می کند (فریری و آلریچ، ۱۹۸۸) و چون در محاسبات ماتریسی و پردازش تصویر ابزار بسیار قدرتمندی است (ریچاردسون و زانت، ۲۰۰۵؛ آندرس و هانت، ۱۹۷۷ و آستر و همکاران، ۲۰۰۳) در این مقاله از این روش استفاده شده است.

ماتریس داده های لرزه ای با  $M$  ردلرزه و  $N$  نمونه در هر ردلرزه را به صورت رابطه (۱) در نظر می گیریم.

$$X_{N \times M} = \{x_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M \quad (۱)$$

SVD ماتریس  $X$  به صورت رابطه (۲) تعریف می شود.

$$X_{N \times M} = U_{N \times N} \Lambda_{N \times M} V_{M \times M}^T \quad (۲)$$

که در آن،  $T$  بیانگر ترانواده ماتریس و  $U$  یک ماتریس متعامد  $N \times N$ ، که ستون  $i$  ام آن بردار ویژه  $i$  ام،  $u_i$ ، ماتریس  $XX^T$  است و رابطه (۳) برای آن برقرار است.

$$XX^T u_i = \eta_i^2 u_i \quad (۳)$$

$V$  یک ماتریس متعامد  $M \times M$  است، که ستون  $i$  ام آن بردار ویژه  $i$  ام،  $v_i$ ، ماتریس  $X^T X$  است و رابطه (۴) برای آن برقرار است.

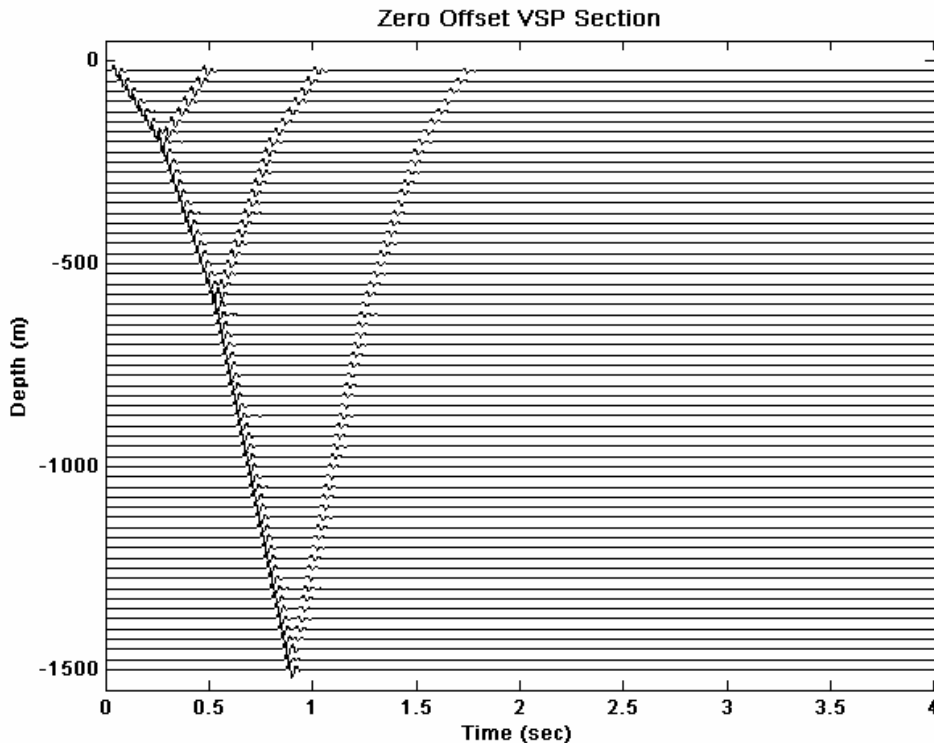
از پایین‌رونده با استفاده از SVD اندازه‌گیری زمان اولین رسیده‌ها است. سپس این زمان به ردلرزه‌ها اضافه یا کم می‌شود تا در حد امکان بسته به هندسه بازتابنده، بالارونده‌ها یا پایین‌رونده‌ها به خط شوند. در این حالت ماتریس مقطع لرزه‌ای به مقادیر تکین تجزیه می‌شود و با سعی و خطا، بالارونده‌ها از پایین‌رونده‌ها جدا می‌شوند.

در شکل ۱ داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم مصنوعی از یک مدل زمین‌شناسی ساده با سه لایه افقی (مطابق جدول ۱) بدون در نظر گرفتن تکراری‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات لایه‌های مدل مصنوعی.

لایه	سرعت ( $ms^{-1}$ )	ضخامت (m)
اول	۸۰۰	۲۰۰
دوم	۱۵۰۰	۴۰۰
سوم	۲۵۰۰	۹۰۰

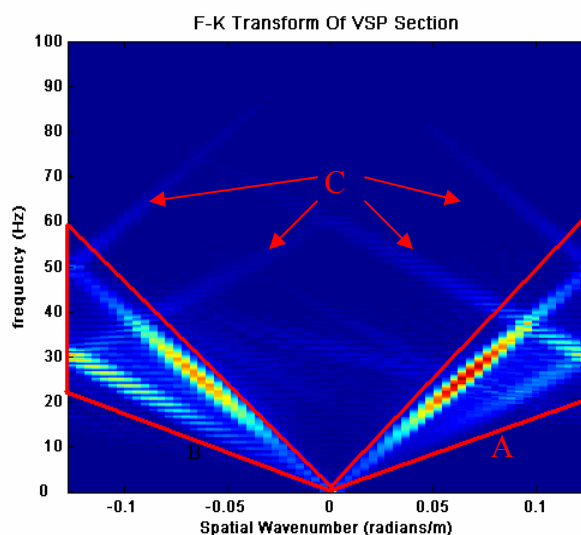
است. الگوریتم‌های متفاوتی برای تقویت بازتاب‌های بالارونده اولیه، تضعیف بازتاب‌های تکراری و حذف نوفه‌ها در پردازش داده‌های VSP به کار برده می‌شود. ویرایش داده‌ها، اندازه‌گیری زمان اولین رسید، اعمال تصحیحات استاتیکی، جداسازی امواج پایین‌رونده از بالارونده و بازیافت دامنه‌های حقیقی، از جمله مراحل پردازشی مرسوم در VSP هستند. طراحی اپراتورهای واهم‌میخت پیشگو از روی امواج پایین‌رونده و کاربرد آن در تضعیف تکراری‌ها در امواج بالارونده و داده‌های لرزه سطحی، از جمله کاربردهای مهم VSP هستند (گرامی، ۱۳۸۰). بنابراین یکی از مراحل مهم پردازش داده‌های VSP، جداسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده است. در کنار این مسئله، بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه نیز برای ما مطلوب است. با توجه به مفاهیم ذکر شده در قسمت‌های قبل، مرحله اول در جداسازی امواج بالارونده



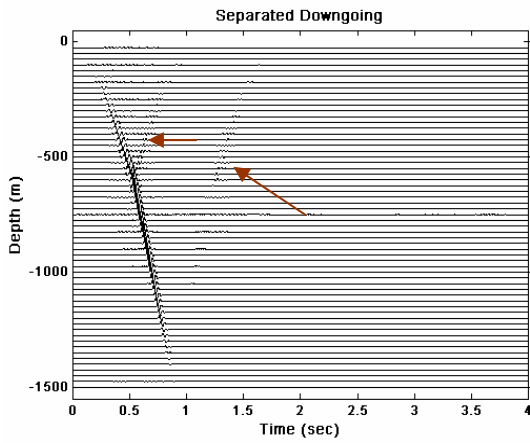
شکل ۱. داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم مصنوعی از مدل زمین‌شناسی جدول ۱.

پردازشی معمول در VSP با اعمال شیفت استاتیکی به هر ردلرزه اجرا می‌شود و با این کار، بالارونده‌ها یا پایین‌رونده‌ها بسته به هندسه بازتابنده‌ها و با اندازه‌گیری زمان اولین رسید و اعمال شیفت استاتیکی به جلو یا به عقب، تقریباً به خط می‌شوند. چنانچه جداسازی امواج بالارونده هدف باشد، بایستی امواج بالارونده به خط شوند و اگر هدف جداسازی امواج پایین‌رونده است، بایستی امواج پایین‌رونده به خط شوند. در شکل ۴-الف و ب نتیجه اعمال شیفت استاتیکی به جلو و عقب به هر ردلرزه به اندازه زمان اولین رسید در همان ردلرزه، نشان داده شده است. در قسمت (ج) و (د) شکل ۴ به ترتیب منحنی بزرگی مقادیر تکین برای دو مقطع به دست آمده نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، سه مقدار تکین اول برای حالت (الف) دارای بیشترین بزرگی‌اند و بنابراین سه ویژه‌تصویر متناظر با آنها برای بازسازی بالارونده‌ها مناسب هستند. در مورد حالت (ب)، اولین مقدار تکین دارای بیشترین بزرگی است و بنابراین اولین ویژه‌تصویر متناظر با آن برای بازسازی پایین‌رونده‌ها مناسب است.

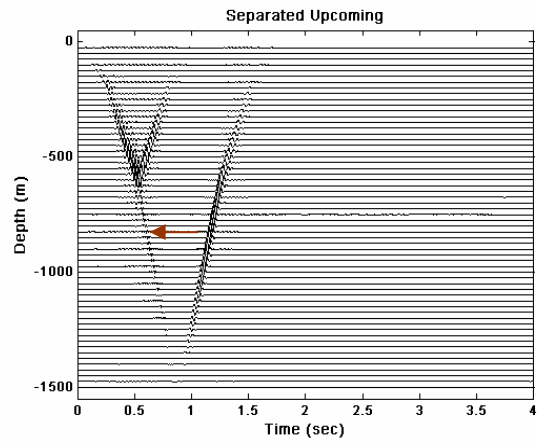
در شکل ۲ داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم در حوزه  $f-k$  نمایش داده شده است. با طراحی یک فیلتر در این حوزه، ناحیه مربوط به پایین‌رونده‌ها (ناحیه A) حذف می‌شود که نتیجه حاصل، در شکل ۳-الف نشان داده شده است. به دلیل وجود الیاسینگ مکانی داده‌ها نمی‌توان ناحیه مربوط به پایین‌رونده‌ها را به‌طور کامل حذف کرد، بنابراین در امواج بالارونده جداسازی، مقداری از امواج پایین‌رونده نیز مشاهده می‌شود. دوباره فیلتر  $f-k$  روی داده‌ها اعمال می‌شود، با این تفاوت که این بار ناحیه مربوط به بالارونده‌ها (ناحیه B) حذف می‌شود و پایین‌رونده‌ها از بالارونده‌ها جدا می‌شوند. نتیجه این جداسازی نیز در شکل ۳-ب نشان داده شده است. در این حالت نیز مانند حالت قبل، مشکل الیاسینگ مکانی داده‌ها خود را با حضور مقداری از امواج بالارونده در امواج پایین‌رونده نشان می‌دهد. البته با توجه به ماهیت فیلتر  $f-k$  دیده می‌شود که در هر دو حالت، علاوه بر تضعیف امواج نامطلوب، امواج مطلوب نیز تا حدی تضعیف شده‌اند. به منظور جداسازی بالارونده‌ها و پایین‌رونده‌ها در VSP با استفاده از SVD بایستی یک وابستگی خطی در امواج مورد نظر وجود داشته باشد. چنین فرایندی در مراحل



شکل ۲. داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم در حوزه  $f-k$ ، ناحیه A برای حذف پایین‌رونده‌ها و ناحیه B برای حذف بالارونده‌ها به کار می‌روند. C نشان‌دهنده امواج الیاس شده مکانی است.

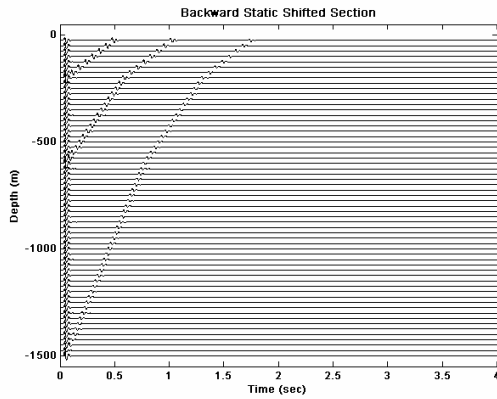


(ب)

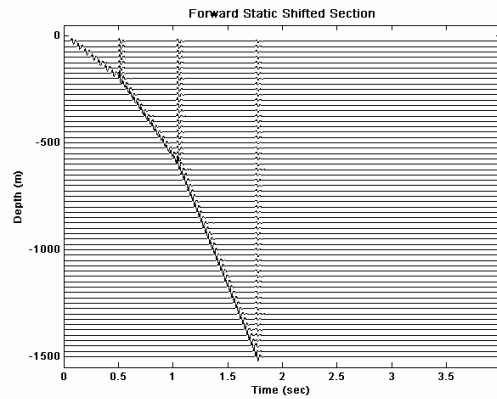


(الف)

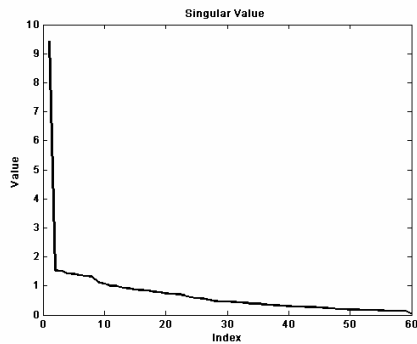
شکل ۳. (الف) امواج بالارونده جدا شده با فیلتر f-k. (ب) امواج پایین‌رونده جدا شده با فیلتر f-k. پیکان‌ها نشان‌دهنده امواج الیاس مکانی هستند که پس از فیلتر باقی مانده‌اند.



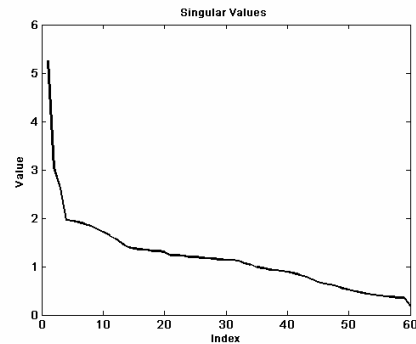
(ب)



(الف)



(د)

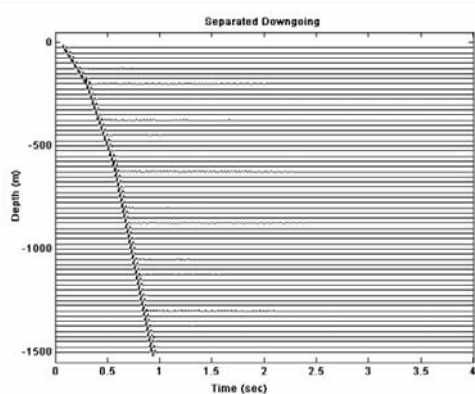


(ج)

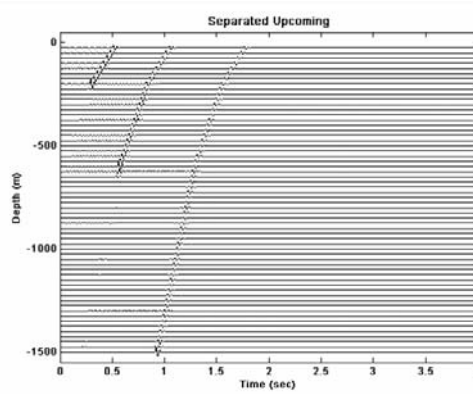
شکل ۴. (الف) داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم مصنوعی شکل ۱ با اعمال شیفت استاتیکی به جلو. (ب) داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم مصنوعی شکل ۱ با اعمال شیفت استاتیکی به عقب. (ج) منحنی بزرگی مقادیر تکین برای مقطع شیفت داده شده به عقب. (د) منحنی بزرگی مقادیر تکین برای مقطع شیفت داده شده به جلو.

نوفه و در شکل ۶- ب مقطع VSP در حوزه f-k نشان داده شده است. مانند حالت بدون نوفه امواج پایین‌رونده با حذف ناحیه مربوط به بالارونده‌ها، جدا می‌شوند که نتایج در شکل ۶- ج نشان داده شده است. شکل ۶- د نتیجه جداسازی امواج بالارونده از پایین‌رونده با حذف ناحیه مربوط به پایین‌رونده‌ها را نشان می‌دهد. نتایج کار با استفاده از SVD نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت نوفه‌دار نیز روش SVD برتری خود را حفظ کرده و در عین حال نسبت سیگنال به نوفه را نیز افزایش داده است.

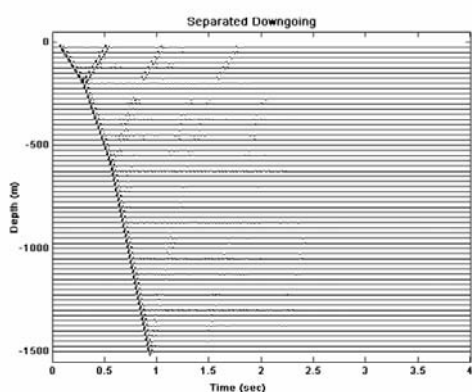
شکل ۵- الف نتیجه بازسازی بالارونده‌ها با سه ویژه‌تصویر قسمت (ج) را نشان می‌دهد و نتیجه بازسازی پایین‌رونده‌ها با کمک اولین ویژه‌تصویر قسمت (د) در شکل ۵- د نشان داده شده است. نتایج بازسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده با استفاده از ۸ ویژه‌تصویر نیز برای مقایسه به ترتیب در شکل‌های ۵- ج برای امواج بالارونده و ۵- د برای امواج پایین‌رونده نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن ویژه‌تصویرهای بیشتر مقداری از امواج نامطلوب در هر مرحله وارد نتایج می‌شود. در شکل ۶- الف مقطع پروفیل لرزه‌ای قائم حاوی



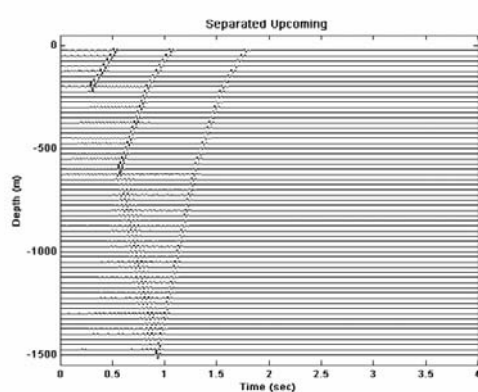
(ب)



(الف)

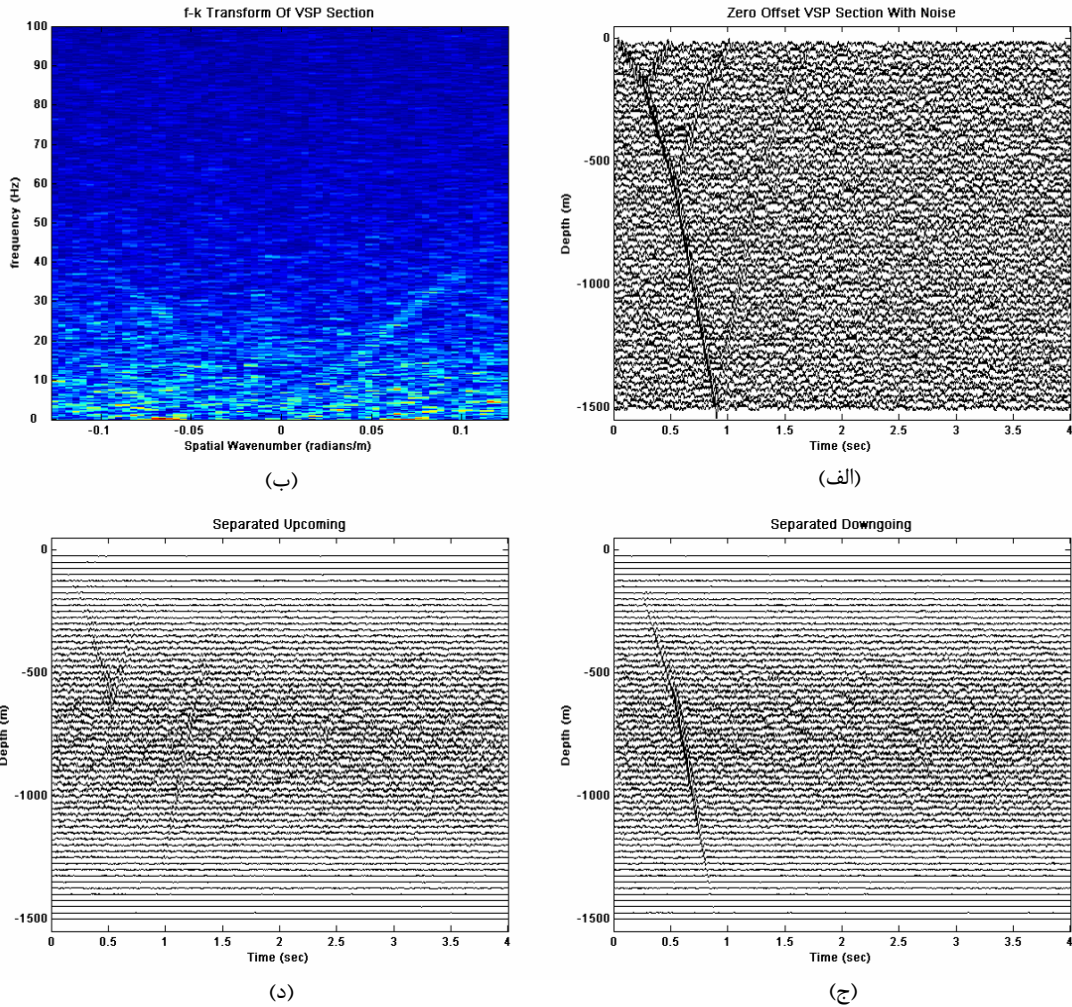


(د)



(ج)

شکل ۵. (الف) امواج بالارونده جدا شده با استفاده از روش SVD با سه ویژه‌تصویر اول (شکل ۴- ج). (ب) امواج پایین‌رونده جدا شده با استفاده از روش SVD با اولین ویژه‌تصویر (شکل ۴- د). (ج) امواج بالارونده جدا شده با استفاده از روش SVD با هشت ویژه‌تصویر اول (شکل ۴- ج). (د) امواج پایین‌رونده جدا شده با استفاده از روش SVD با هشت ویژه‌تصویر اول (شکل ۴- د).



شکل ۶. (الف) داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم مصنوعی از مدل زمین‌شناسی جدول ۱ به همراه نوفه. (ب) مقطع VSP به همراه نوفه در حوزه f-k. (ج) امواج پایین‌رونده با استفاده از فیلتر f-k. (د) امواج بالارونده با استفاده از فیلتر f-k.

#### ۴ اعمال روش روی داده‌های واقعی

این قسمت نتایج حاصل از اعمال روش‌های جداسازی f-k و SVD روی داده‌های واقعی را نشان می‌دهد.

در شکل ۸-الف داده‌های واقعی نشان داده شده است. داده‌ها مربوط به یک عملیات دورافت صفر است. در شکل ۸-ب مقطع f-k داده‌های واقعی نشان داده شده است. مانند داده‌های مصنوعی در دو مرحله با حذف ناحیه

مربوط به امواج نامطلوب، امواج مطلوب به دست آمده‌اند که نتایج آن برای امواج بالارونده و پایین‌رونده به ترتیب در شکل‌های ۸-ج و ۸-د نشان داده شده است.

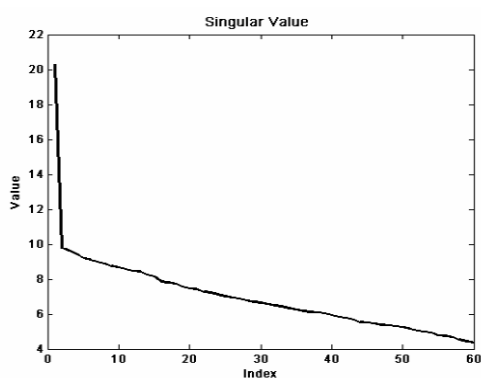
در ادامه، برای جداسازی امواج بالارونده و پایین‌رونده از یکدیگر با استفاده از روش SVD، ابتدا بایستی زمان اولین رسیده‌ها انتخاب می‌شدند. بعد از انتخاب زمان اولین رسیده‌ها، برای جداسازی امواج بالارونده، مقدار

## ۵ بحث و نتیجه گیری

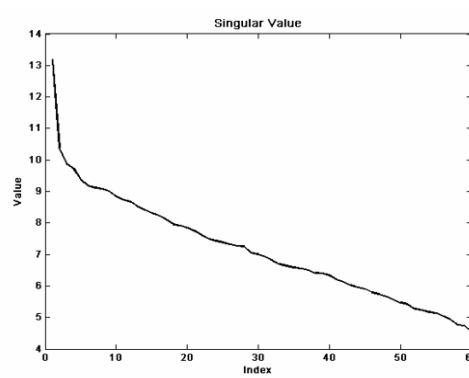
از نتایج حاصل از شبیه سازی روش های  $f-k$  و SVD برای جداسازی امواج بالارونده و پایین رونده از یکدیگر می توان نتایج زیر را بیان نمود:

۱. جداسازی امواج با استفاده از روش SVD نسبت به روش فیلتر  $f-k$  از دقت بسیار بالایی چه در حالت حضور نوفه و چه در حالت بدون نوفه برخوردار است، زیرا همان طور که در نتایج حاصل از داده های مصنوعی و واقعی دیده شد، روش تجزیه مقدار تکین نوفه ها را به ماتریس های ویژه تصویر متناظر با مقادیر تکین انتهایی (کوچک) نسبت داده و به طور خودکار در بازسازی با مقادیر تکین بالا دخالتی نمی کند و باعث افزایش نسبت سیگنال به نوفه می شود.

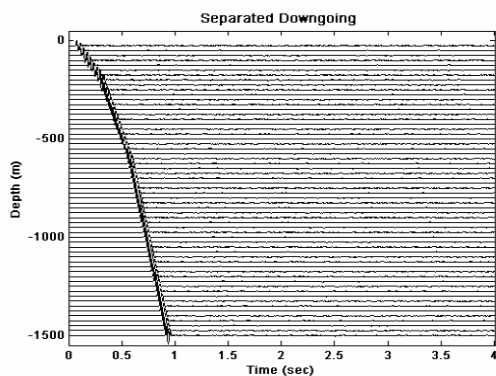
زمان اولین رسید موج در عمق هر ردلرزه به آن افزوده شد تا بالارونده ها به خط شوند. سپس با استفاده از روش SVD و استفاده از اولین ویژه تصویر، امواج بالارونده بازسازی شد که نتیجه آن در شکل ۹-ب آورده شده است و نمودار مربوط به بزرگی مقادیر تکین نیز در شکل ۹-الف نشان داده شده است. در مرحله بعد برای جداسازی امواج پایین رونده مقادیر زمان اولین رسید در هر عمق از ردلرزه مربوطه کسر شد تا امواج پایین رونده به خط شوند. سپس با استفاده از دو ویژه تصویر اول، امواج پایین رونده بازسازی شد که نتایج در شکل ۹-د نشان داده شده است. نمودار مربوط به بزرگی مقادیر تکین در این حالت در شکل ۹-ب نشان داده شده است.



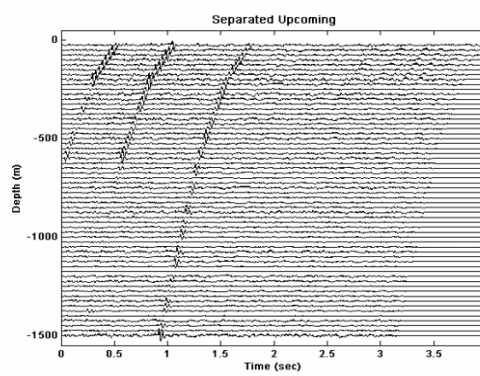
(ب)



(الف)



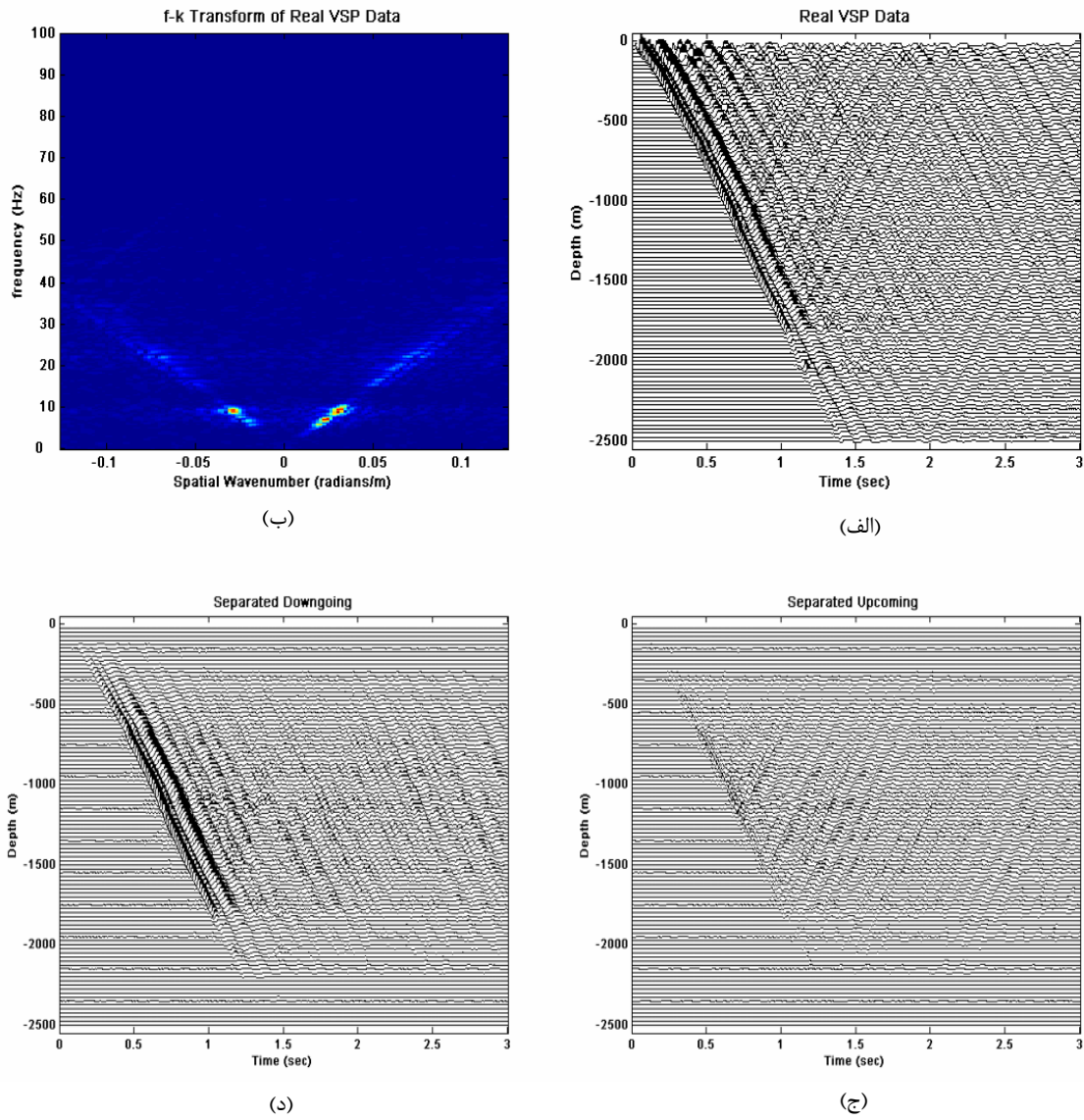
(د)



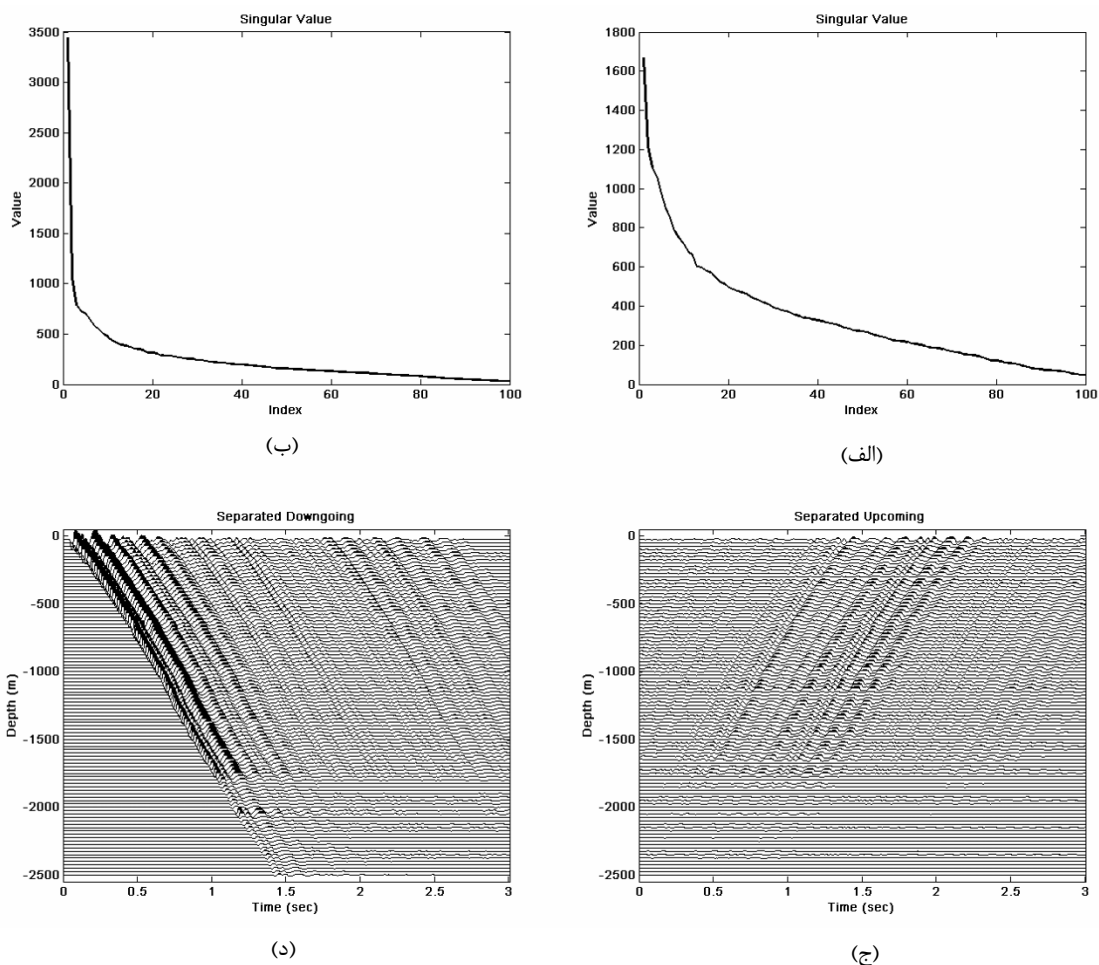
(ج)

شکل ۷. (الف) منحنی بزرگی مقادیر تکین برای مقطع شیفته داده شده به جلو. (ب) منحنی بزرگی مقادیر تکین برای مقطع شیفته داده شده به عقب. (ج) امواج بالارونده با سه ویژه تصویر اول (شکل ۷-الف). (د) امواج پایین رونده با اولین ویژه تصویر (شکل ۷-ب).





شکل ۸. (الف) مقطع VSP واقعی. (ب) مقطع f-k داده‌های VSP واقعی. (ج) امواج بالارونده جداسازی شده با استفاده از روش فیلتر f-k. (د) امواج پایین‌رونده جداسازی شده با استفاده از روش فیلتر f-k.



شکل ۹. (الف) مقادیر تکین برای مقطع شیفیت داده شده به جلو داده‌های واقعی. (ب) مقادیر تکین برای مقطع شیفیت داده شده به عقب داده‌های واقعی. (ج) امواج بالارونده با اولین ویژه‌تصویر. (د) امواج پایین‌رونده با دو ویژه‌تصویر اول.

بالارونده به دلیل قوی‌تر بودن این امواج در مقطع VSP از دقت و کیفیت بیشتری برخوردار است، زیرا مقدار تکین این امواج اختلاف بیشتری با سایر مقادیر تکین نسبت به حالت جداسازی بالارونده‌ها دارند.

۵. انتخاب دقیق تعداد ویژه‌تصویرهای مورد نیاز برای بازسازی امواج موردنظر، علاوه بر نمودار بزرگی مقادیر تکین، نیاز به سعی و خطا نیز دارد.

۲. با توجه به نظریه تبدیل فوریه، برای اعمال روش  $f-k$  روی داده‌ها نیاز به نمونه‌برداری منظم زمانی و مکانی است. این در حالی است که روش SVD برای جداسازی امواج از یکدیگر، نیازی به نمونه‌برداری منظم زمانی و مکانی ندارد.

۳. در روش SVD نیازی به انتخاب دقیق زمان اولین رسیده‌ها نیست.

۴. جداسازی امواج پایین‌رونده نسبت به جداسازی امواج

- vertical seismic profiling: *Geophysics*, **53**, 778-785.
- Hardage, B. A., 2000, *Vertical seismic profiling: Principles*, New York, Pergamon.
- Hemon, C., and Mace, D., 1978, The use of the Karhunen-Loeve transformation in seismic data-processing: *Geophys. Prospect.* **26**, 600-626.
- Jones, I. F., 1985, Applications of the Karhunen-Loeve transform in reflection seismology: Ph.D. thesis, Univ. of British Columbia.
- Richardson, M. R., and Zandt, G., 2005, Inverse problems in geophysics, A set of lecture notes.
- Suprajitno, M., and Greenhalgh, S. A., 1985, Separation of upgoing and downgoing waves in vertical-seismic-profiling by contour-slice filtering: *Geophysics*, **50**, 950-962.
- Treitel, S., Shanks, J. L., and Frazier, C. W., 1967, Some aspects of fan filtering: *Geophysics*, **32**, 789-800.
- منابع
- سیاهکوهی، ح. ر.، ۱۳۷۹، استفاده از تبدیل Karhunen-Loeve در پردازش داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی: مجله فیزیک زمین و فضا، **۲۶**، ۱۰۶-۹۷.
- گرامی، ه.، ۱۳۸۰، پردازش داده‌های لرزه‌نگاری درون‌چاهی منطقه دشت آبادان و به‌کارگیری امواج پایین‌رونده جهت تضعیف بازتاب‌های تکراری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران.
- Andrews, H. C., and Hunt, B. R., 1977, *Digital image restoration*: Prentice-Hall, New Jersey.
- Aster, R. C., Borchers, B., and Thurber, C., 2003, *Parameter estimation and inverse problems*, course note.
- Cassell, B., 1984, Interactive VSP-CDP mapping in complex media: 54th Ann. Internat. Mtg.
- Freire, S. L. M., and Ulrych, T. J., 1988, Application of singular value decomposition to