



تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی با استفاده از فیلتر انتشار ناهمسانگرد غیر خطی تانسوری

محمد شکفته زوارم^۱، امین روشندل کاهو^{۲*} و هادی گرایلو^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: roshandel@shahroodut.ac.ir

چکیده

روش‌های لرزه‌ای بازتابی، یکی از شیوه‌های بررسی ساختارهای زیرسطحی جهت اکتشاف ذخایر هیدروکربنی هستند. حضور انرژی‌های ناخواسته همواره در طی یک عملیات لرزه‌ای غیرقابل اجتناب است. به همین منظور سیگنال‌های دریافتی، آلوده به نوفه خواهند بود. بخش قابل توجهی از این نوفه‌ها، نوفه‌های تصادفی هستند. نسبت سیگنال به نوفه پایین داده‌ها تأثیر مخربی در تفسیر نهایی داده‌ها خواهد داشت. از این‌رو نیاز به مراحل پردازشی جهت تضعیف نوفه در داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های توسعه‌یافته در حوزه پردازش تصویر به منظور تضعیف نوفه در داده‌های لرزه‌ای، می‌توانند بسیار مفید باشند. یک دسته مهم از روش‌هایی که برای کاهش اثر نوفه تصادفی مؤثر هستند، روش‌های مبتنی بر هموارسازی می‌باشند؛ که عمدتاً باعث تار شدگی و از بین رفتن جزئیات تصویر می‌شوند. فیلتر انتشار یکی از روش‌های هموارسازی است؛ که با شبیه‌سازی فرایند فیزیکی انتشار به صورت کنترل‌شده به تضعیف نوفه تصادفی در تصاویر می‌پردازد. در نسخه‌های بهبود یافته فیلتر انتشار که به نام غیرخطی نامیده می‌شوند، مشکل تارشدگی بر طرف شده است. در این مقاله، با استفاده از فیلتر انتشار غیرخطی سعی شده است، نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای تضعیف شوند. الگوریتم مذکور بر روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی اعمال و نتایج آن با روش‌های متداول مانند واهمامیخت فرکانس-مکان و میانه مقایسه شد. بهبود در نسبت سیگنال به نوفه به همراه افزایش همدوسی و بهبود در وضعیت لبه‌ها در رویدادهای بازتابی از مزایای روش فیلتر انتشار غیرخطی در مقایسه با دو روش متداول واهمامیخت فرکانس-مکان و میانه می‌باشند.

واژگان کلیدی

داده‌های لرزه‌ای بازتابی
نوفه تصادفی
تضعیف نوفه
پردازش تصویر
فیلتر انتشار ناهمسانگرد غیرخطی

۱- مقدمه

داده‌های لرزه‌ای برداشت شده همواره آغشته به نوفه می‌باشند. نوفه‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای به دو دسته کلی همدوس و ناهمدوس تقسیم‌بندی می‌شوند (Sheriff and Geldart, 1995). نوفه‌های ناهمدوس که تصادفی نیز نامیده می‌شوند؛ اختلالات موجود در داده‌های لرزه‌ای هستند که همبستگی بین آن‌ها و داده وجود ندارد و در تمام فرکانس‌ها و زمان‌ها قابل مشاهده می‌باشند. این دسته از نوفه‌ها، منابع تولید متعددی دارد (Yilmaz and Doherty, 2001). چنانچه نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی باقی بماند، باعث ایجاد مشکلات فراوان در مراحل پردازش و تفسیر می‌شود. لذا برای به دست آوردن یک داده لرزه‌ای با کیفیت مناسب برای مراحل بعدی پردازش و تفسیر، باید فرآیند تضعیف نوفه بر روی داده‌های لرزه‌ای اعمال گردد. روش‌های تضعیف نوفه تصادفی به دو دسته قبل و بعد از برانبارش تقسیم می‌شوند. البته بخشی از نوفه‌های تصادفی به دلیل عدم همبستگی در ردلرزه‌ها در مرحله برانبارش تضعیف می‌گردد، با این وجود میزان قابل توجهی از آن‌ها در داده لرزه‌ای پس از برانبارش باقی می‌ماند؛ که تضعیف آن‌ها نیازمند روش‌های پیشرفته‌تر است (Hatton et al., 1991).

تاکنون روش‌های مختلفی برای تضعیف نوفه تصادفی به کار رفته شده‌اند. از ابتدایی‌ترین روش‌های تضعیف نوفه تصادفی، محدود کردن باند فرکانسی توسط فیلترهای میان‌گذر و پایین‌گذر است؛ اما به دلیل همپوشانی باند فرکانسی نوفه و سیگنال، استفاده از فیلترهای فرکانسی موفقیت چندانی در تضعیف نوفه تصادفی ندارند (Proakis and Manolakis, 2007). یک دسته از مهم‌ترین روش‌های تضعیف نوفه، روش‌های مبتنی بر تبدیل‌ها هستند. در این روش‌ها با استفاده از انتقال داده از یک حوزه به حوزه دیگری که قابلیت بیشتری در تفکیک سیگنال و نوفه دارد، فرآیند تضعیف نوفه انجام می‌شود. فیلتر $f-k$ یکی از روش‌های مبتنی بر تبدیل است که با انتقال داده از حوزه زمان - مکان به حوزه فرکانس - عدد موج و صفر کردن ضرایب مربوط به محدوده نوفه و برگردان به حوزه زمان - مکان، فرآیند تضعیف نوفه انجام می‌شود (Hornbostel and Bishop, 1990, Yilmaz and Doherty, 2001). فیلتر کاذو در حوزه $f-xy$ نیز یکی دیگر از روش‌های تضعیف نوفه با استفاده از انتقال داده از یک حوزه به حوزه دیگر است؛ که با اعمال فیلتر تصاویر ویژه بر روی مقاطع تک فرکانس، نوفه تصادفی را تضعیف می‌نماید (Trickett, 2008). تبدیل‌های زمان-فرکانس، تبدیل موجک و تبدیل کمناک- که ابزار مناسبی برای تحلیل سیگنال‌های ناپایا می‌باشند- از جمله تبدیل‌های جدید مورد استفاده در تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای می‌باشند (Deng et al., 2015, Haghshenas Lari and Gholami, 2014, Miao and Cheadle, 1998).

دسته‌ای دیگر از روش‌های تضعیف نوفه تصادفی بر اساس

کاهش رتبه ماتریس داده است که با فرض رتبه پایین بودن داده بدون نوفه، به بازیابی سیگنال تمیز می‌پردازند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تجزیه تصویر ویژه (Freire and Ulrych, 1988, Trickett, 2003)، تبدیل کارهون-لوو (Jones and Levy, 1987)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Hagen, 1982) و تجزیه مقادیر تکین (Ursin and Zheng, 1985) اشاره نمود.

یکی از روش‌های قدیمی و کارآمد تضعیف نوفه که پیشرفت‌های بسیار خوبی داشته است؛ فیلترهای هموارساز هستند. این دسته روش‌ها به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. ساده‌ترین نوع فیلترهای هموارساز خطی، فیلتر میانگین‌گیر است که با جایگزین کردن مقدار میانگین پیکسل‌های یک همسایگی به جای مقدار پیکسل مرکزی نوفه تصادفی را کاهش می‌دهد (Dangeti, 2003). تضعیف نوفه توأم با حفظ ساختارها همواره مسئله مهمی در حوزه کاربرد این روش‌هاست. فیلترهای خطی توانایی حفظ جزئیات را ندارند و موجب تار شدن تصاویر می‌شوند (Weickert, 1998). به منظور برطرف کردن این مشکل، فیلترهای هموارساز غیرخطی که توانایی بیشتری در حفظ جزئیات دارند، معرفی شدند. از جمله فیلترهای هموارساز غیرخطی می‌توان فیلترهای میانه (Dangeti, 2003)، فیلترهای نگه‌دارنده لبه (AlBinHassan et al., 2006) و میانگین‌گیر غیرمحملی (Bonar and Sacchi, 2012) را نام برد. اغلب این روش‌ها، شکل موجک چشمه لرزه‌ای را تغییر می‌دهند؛ لذا مباحث مربوط به روش‌های هموارسازی جهت یافته مورد توجه قرار گرفت.

فیلترهای انتشار خطی - که دسته مهمی از فیلترهای هموارساز هستند- اولین بار در سال ۱۹۸۳ معرفی شدند (Witkin, 1983, Witkin, 1984). علی‌رغم هموارسازی مؤثری که این نوع فیلتر دارد، به دلیل هموارسازی یکسان در تمام نقاط و جهات، موجب از دست رفتن اطلاعات مفید در تصویر و تار شدن آن می‌شود. برای رفع مشکل مذکور، نوع غیرخطی فیلترهای انتشار در سال ۱۹۸۷ معرفی گردید (Perona and Malik, 1987, Perona and Malik, 1990). این فیلتر ابتدا برای بهبود تصاویر پزشکی و برخی زمینه‌های دیگری چون بخش‌بندی بافت تصاویر و بازیابی تصاویر استفاده شد (Kroon, 2011). فیلتر انتشار غیرخطی به‌منظور تضعیف نوفه تصادفی و بهبود ساختارها و همدوسی در داده‌های لرزه‌ای نیز استفاده شده است (Enli and Gaohan, 2013, Imhof, 2003).

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از فیلتر انتشار غیرخطی نوفه‌های تصادفی تضعیف شوند. در ادامه تئوری فیلتر انتشار غیرخطی به صورت مختصر بیان می‌شود. سپس از این نوع فیلتر برای تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی استفاده می‌شود. به منظور بررسی کارایی فیلتر انتشار غیرخطی در

ضریب انتشار در فیلترهای غیرخطی در نظر گرفته می‌شوند، به صورت روابط (۳) و (۴) می‌باشند (Perona and Malik, 1990) که تابعی از گرادیان‌های تصویر هستند. این توابع به گونه‌ای تعیین می‌شوند که در نواحی یکنواخت (فاقد لبه) بیشترین مقدار و در محل لبه‌ها کمترین مقدار را داشته باشند؛ تا با این روش تارشدگی تصویر خروجی به حداقل برسد. همان‌طور که بیان شد، میزان هموارسازی توسط ضریب انتشار کنترل می‌شود؛ به عبارت دیگر، هرچه مقدار ضریب انتشار بیشتر باشد، میزان هموارسازی نیز بیشتر خواهد شد و بالعکس.

$$w_1(x, y, t) = e^{-(\nabla u / \eta)^2} \quad (3)$$

$$w_2(x, y, t) = 1 / (1 + (\nabla u / \eta)^2) \quad (4)$$

که η پارامتر آستانه گرادیان است که مقدار هموارسازی را در هر نقطه کنترل می‌کند. اگر مقدار η کمتر از مقدار بهینه باشد، نوفه به طور کامل حذف نمی‌شود و اگر مقدار آن بیشتر از مقدار بهینه انتخاب شود، تصویر ورودی دچار هموارشدگی بیش از حد می‌شود. اگر مقدار گرادیان خیلی بزرگ‌تر از آستانه گرادیان باشد، مقدار تابع انتشار به مقدار صفر نزدیک می‌شود و اگر مقدار گرادیان کوچک‌تر از مقدار آستانه گرادیان باشد، مقدار تابع انتشار به عدد ۱ نزدیک می‌شود. از آن جایی که مقدار گرادیان در محل لبه‌ها یک مقدار بزرگ است، لذا مقدار ضریب انتشار در آن محل کاهش یافته و هموارسازی کمتری صورت می‌گیرد و بنابراین لبه‌ها حفظ خواهند شد. مقدار پارامتر آستانه گرادیان را می‌توان به صورت تطبیقی تعیین نمود (Baddari et al., 2011).

به منظور پیاده‌سازی فیلتر انتشار بر روی یک تصویر رقمی، باید معادله انتشار رابطه (۲) به صورت گسسته و عددی تبدیل شود. روش‌های مختلفی برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیلی وجود دارد. در این مقاله از روش تفاضل محدود برای گسسته‌سازی معادله انتشار استفاده شده است؛ که به صورت روابط (۵) تا (۷) است (Baddari et al., 2011).

$$u_q^{t+1} = u_q^t + \sum_{l \in n_q} w_{q,l}^t \nabla u_{q,l}^t \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \nabla u_{q,N}^t &= u_N^t - u_q^t & \nabla u_{q,NE}^t &= u_{NE}^t - u_q^t \\ \nabla u_{q,S}^t &= u_S^t - u_q^t & \nabla u_{q,NS}^t &= u_{NS}^t - u_q^t \\ \nabla u_{q,E}^t &= u_E^t - u_q^t & \nabla u_{q,SE}^t &= u_{SE}^t - u_q^t \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \nabla u_{q,W}^t &= u_W^t - u_q^t & \nabla u_{q,SW}^t &= u_{SW}^t - u_q^t \\ w_{q,N}^t &= g_i(|\nabla u_{q,N}^t|) & w_{q,NE}^t &= g_i(|\nabla u_{q,NE}^t|) \\ w_{q,E}^t &= g_i(|\nabla u_{q,E}^t|) & w_{q,NS}^t &= g_i(|\nabla u_{q,NS}^t|) \\ w_{q,S}^t &= g_i(|\nabla u_{q,S}^t|) & w_{q,SE}^t &= g_i(|\nabla u_{q,SE}^t|) \\ w_{q,W}^t &= g_i(|\nabla u_{q,W}^t|) & w_{q,SW}^t &= g_i(|\nabla u_{q,SW}^t|) \end{aligned} \quad (7)$$

تضعیف نوفه تصادفی، نتایج حاصل با نتایج فیلتر واهمامیخت فرکانس- مکان و فیلتر میانه مقایسه می‌شود.

۲- فیلترهای انتشار

ایده اصلی این فیلتر به فرآیند انتشار باز می‌گردد. انتشار، فرآیند فیزیکی است که در پی آن تمرکز یک کمیت فیزیکی (مانند انرژی یا جرم) در یک محیط به تعادل می‌رسد، بدون تولید یا از بین رفتن آن کمیت فیزیکی که در واقع بر پایه قانون پایستگی (انرژی یا جرم) بنا شده است. قانون حاکم بر فرآیند انتشار، قانون فیک است؛ که طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود (Bokstein et al., 2005).

$$j = w \nabla u \quad (1)$$

که j شار انتشار کمیت فیزیکی u ، w ضریب انتشار و ∇u اختلاف تمرکز کمیت فیزیکی است. طبق قانون فیک، اختلاف تمرکز کمیت فیزیکی باعث به وجود آمدن جریانی می‌شود؛ تا اختلاف تمرکز جبران شود. سرعت و مقدار این فرآیند انتشار با متغیری به نام ضریب انتشار تعیین می‌شود.

در علم فیزیک کمیت فیزیکی u جرم یا انرژی در نظر گرفته می‌شود. به منظور استفاده از فرآیند انتشار در پردازش تصویر، می‌توان شدت روشنایی هر پیکسل تصویر در مقیاس خاکستری را به عنوان یک کمیت فیزیکی در نظر گرفت. هر داده لرزه‌ای دو بعدی را می‌توان به عنوان یک تصویر در مقیاس خاکستری در نظر گرفت که دامنه ردلرزه در هر زمان به عنوان شدت روشنایی برای هر پیکسل است؛ بنابراین می‌توان از فرآیند انتشار در تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای استفاده نمود.

معادله حاکم بر فرآیند انتشار یک معادله مشتقات جزئی است که مطابق رابطه (۲) بیان می‌شود (Baddari et al., 2011).

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (w(x, y, t) \nabla u(x, y, t)) \quad (2)$$

$$u(x, y, t)|_{t=0} = u_0(x, y)$$

که t زمان انتشار، ∇ نمایانگر عملگر دیورژانس و w ضریب

انتشار است. u_0 توزیع کمیت فیزیکی در محیط در زمان صفر و u توزیع کمیت فیزیکی بعد از گذشت زمان انتشار t است. اگر در رابطه (۲) مقدار w برابر ثابت ۱ در نظر گرفته شود، رابطه (۲) به شکل معادله گرما تبدیل خواهد شد که ایده اصلی به وجود آمدن فیلترهای خطی انتشار است. اگر ضریب انتشار عدد ثابت باشد، به دلیل اینکه فرآیند انتشار مستقل از تصویر ورودی خواهد بود، فیلتر انتشار را خطی می‌نامند. نوع خطی فیلتر انتشار به دلیل هموارسازی یکسان در تمام نقاط در سراسر تصویر، سبب از بین رفتن لبه‌ها و جزئیات تصویر و در نتیجه کاهش کیفیت تصویر می‌شود. اگر ضریب انتشار به صورت تابعی از تصویر ورودی در نظر گرفته شود، فیلتر طراحی‌شده از نوع غیرخطی خواهد بود. دو تابع متداول که برای

این نوع از فیلتر انتشار با توجه به ساختار داده‌های لرزه‌ای می‌تواند ضمن تضعیف نوفه‌های تصادفی، ساختارهای لبه‌ای نظیر بازتابنده‌ها و گسل‌ها را نیز حفظ نماید. شکل تانسوری معادله انتشار رابطه (۲) به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود (Weickert, 1998).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot D(\nabla u) \quad (۸)$$

که u تصویر ورودی، t زمان انتشار و D تانسور انتشار است که تابعی از گرادیان تصویر ورودی است. برای تعریف تانسور D که یک تانسور درجه دو در فضای دو بعدی است؛ باید مطابق رابطه (۹) بردارها و مقادیر ویژه آن‌ها تعریف شوند.

$$D = (v_1, v_2) \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} (v_1, v_2)^T \quad (۹)$$

که v_1 و v_2 بردارهای ویژه و λ_1 و λ_2 مقادیر ویژه تانسور انتشار هستند. برای محاسبه دو بردار ویژه تانسور انتشار از گرادیان تصویر ورودی استفاده می‌شود. مطابق رابطه (۹)، یکی از بردارهای ویژه، موازی بردار گرادیان و دیگری عمود بر آن در نظر گرفته می‌شود (Weickert, 1998).

$$v_1 \perp \nabla u_\sigma \text{ و } v_2 \perp \nabla u_\sigma \quad (۱۰)$$

که σ انحراف معیار فیلتر گاوسی اعمال شده بر تصویر جهت محاسبه گرادیان است. اعمال فیلتر گاوسی به منظور کاهش اثر نوفه بر روی محاسبه گرادیان است.

برای محاسبه مقادیر ویژه تانسور انتشار دو رویکرد متفاوت وجود دارد. در رویکرد اول، مقادیر ویژه به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود. تعریف مقادیر ویژه به صورت رابطه (۱۱) باعث می‌شود که فیلتر انتشار تانسوری همزمان با تضعیف نوفه در مکان لبه‌ها به بهبود لبه‌ها از طریق هدایت انتشار در جهت ساختارها کمک نماید

$$\lambda_1 = 1 - e^{-c_m / (\frac{\nabla u_\sigma}{\lambda_e})^m}, \lambda_2 = 1 \quad (۱۱)$$

که λ_e پارامتر آستانه است که معمولاً برابر با ۰/۰۲ در نظر گرفته می‌شود، c_m یک عدد ثابت است و باید به گونه‌ای انتخاب شود که تابع شار برای مقادیر کمتر از λ_e افزایشی و برای مقادیر بیشتر از λ_e کاهشی باشد و m عدد ثابت بزرگ‌تر از ۱ است که در این مقاله برابر با ۴ در نظر گرفته شد (Weickert, 1999). در رویکرد دوم، مقادیر ویژه به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$\lambda_i = \begin{cases} \alpha & \mu_i = \mu_2 \\ \alpha + (1 - \alpha) e^{\frac{-c}{(\mu_i - \mu_2)^m}} & \text{otherwise} \end{cases}, \lambda_2 = \alpha \quad (۱۲)$$

که μ_i مقادیر ویژه تانسور ساختاری گرادیان تصویر ورودی

$$n_q = \{N, W, E, S, NE, NW, SE, SW\}$$

که

نشانه‌گر یکی از پیکسل‌ها در همسایگی 3×3 حول پیکسل مرکزی q در هشت جهت شمال، شمال شرق، شمال غرب، جنوب، جنوب شرق، جنوب غرب، غرب، شرق می‌باشند؛ که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

NW	N	NE
W		E
SW	S	SE

شکل ۱: هشت همسایگی حول پیکسل مرکزی در یک پنجره 3×3 که در محاسبه گرادیان‌ها استفاده می‌شوند.

در شکل ۲ الگوریتم فیلتر انتشار غیرخطی پرونا و مالیک به منظور انجام فرآیند نوفه‌زدایی یک تصویر دوبعدی نشان داده شده است. در فیلترهای انتشار غیرخطی مدل پرونا و مالیک، توابع انتشار به صورت اسکالر می‌باشند؛ که سبب می‌شوند این فیلترها به صورت همسانگرد عمل نمایند. با توجه به این که در این نوع از فیلترهای انتشار میزان هموارسازی در محل لبه‌ها در تمام جهات کاهش می‌یابد، لذا فرآیند نوفه‌زدایی در محل لبه‌ها به خوبی انجام نمی‌شود و بخش زیادی از نوفه باقی می‌ماند. این موضوع یکی از ضعف‌های فیلترهای انتشار غیرخطی اسکالر است. برای رفع این مشکل باید تابع انتشار به گونه‌ای انتخاب شود که به صورت ناهمسانگرد عمل کند؛ به عبارت دیگر، فرآیند هموارسازی به صورت جهت‌یافته انجام شود. توابع انتشاری که دارای چنین خاصیتی باشند به صورت تانسوری تعریف می‌شوند. در این نوع از فیلترهای انتشار در هر موقعیت، میزان هموارسازی در جهت بردار گرادیان کمتر و در جهت عمود بر آن بیشتر است. با توجه به خاصیت ناهمسانگردی فیلترهای انتشار تانسوری، در محل لبه علاوه بر حفظ لبه، تضعیف نوفه به خوبی صورت می‌گیرد (Weickert, 1999).

الگوریتم فیلتر انتشار غیرخطی پرونا و مالیک

ورودی‌ها: تصویر دو بعدی یا داده لرزه‌ای آلوده به نوفه تصادفی

خروجی‌ها: تصویر یا داده لرزه‌ای تضعیف نوفه شده

پارامترهای اولیه: نوع تابع انتشار، مقدار آستانه گرادیان، گام زمانی و تعداد تکرارها

تا زمانی که: تعداد تکرارها به مقدار تعیین شده برسد، انجام بده

(۱) محاسبه مقدار بزرگی گرادیان‌های محلی در هشت جهت برای هر پیکسل از روابط

(۲) محاسبه مقدار تابع انتشار در هر پیکسل از روابط

(۳) به روز رسانی تصویر از رابطه معادله انتشار گسسته شده

پایان الگوریتم

شکل ۲: الگوریتم فیلتر انتشار غیرخطی پرونا و مالیک.

دهنده همدوسی به منظور تضعیف نوفه تصادفی اعمال گردید و نتایج به دست آمده با نتایج دو روش متداول واهمامیخت $f-x$ و فیلتر میانه مقایسه شد.

لازم به ذکر است که در تمامی روش‌ها، پارامترهای ورودی الگوریتم به صورت بهینه انتخاب شده‌اند. در شکل ۵ نتایج حاصل از روش‌های مذکور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های فیلتر انتشار تانسوری با دو رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها در تضعیف نوفه تصادفی دارند. البته روش واهمامیخت $f-x$ در مقایسه با روش فیلتر انتشار پرونا و مالیک نوفه تصادفی بیشتری را تضعیف نموده است؛ که با توجه به خاصیت همسانگردی فیلتر انتشار پرونا و مالیک قابل پیش‌بینی بود. به منظور مقایسه بیشتر و بررسی میزان تأثیر الگوریتم‌های مذکور بر روی رویدادهای بازتابی، مقطع حاصل از تفاضل داده آغشته به نوفه و نتایج هر کدام از روش‌ها در شکل ۶ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هیچ کدام از روش‌های مورد بررسی تأثیر مخربی بر روی رویدادهای بازتابی نداشته‌اند. البته ممکن است در نگاه اول به شکل ۶ این‌گونه به نظر بیاید که روش فیلتر انتشار پرونا و مالیک قسمتی از رویدادهای بازتابی را به عنوان نوفه تضعیف نموده است. با دقت بیشتر در نتایج به دست آمده و خاصیت همسانگردی فیلتر انتشار پرونا و مالیک می‌توان دریافت که اثرات قابل مشاهده در مقطع تفاضل روش فیلتر انتشار پرونا و مالیک مربوط به تضعیف نوفه کمتر در محل لبه‌ها (رویدادها) است. به منظور مقایسه دقیق‌تر، ردلرزه دهم از مقاطع لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه، آغشته به نوفه و نتایج نوفه‌زدایی شده با استفاده از روش‌های مذکور در کنار یکدیگر در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین طیف دامنه میانگین هر کدام از مقاطع لرزه‌ای نیز در شکل ۸ نشان داده شده است؛ که به وضوح عملکرد بهتر روش فیلتر انتشار تانسوری نسبت به سایر روش‌ها قابل مشاهده است. به منظور مقایسه کمی نتایج، نسبت سیگنال به نوفه مقاطع نوفه‌زدا شده با هر کدام از روش‌های مورد بررسی به ازای مقاطع لرزه‌ای ورودی با نسبت سیگنال به نوفه مختلف محاسبه گردید؛ که در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج روش فیلتر انتشار تانسوری با دو رویکرد مختلف دارای بالاترین نسبت سیگنال به نوفه خروجی در اغلب مقادیر نسبت سیگنال به نوفه ورودی است.

است، C ، m و α اعداد ثابتی می‌باشند که $C > 0$ ، $m > 1$ و $\alpha \in (0,1)$ (Weickert, 1998, 1999). قبل از محاسبه مقادیر ویژه تانسور ساختاری گرادیان بایستی یک فیلتر گاوسی با انحراف معیار ρ بر روی آن اعمال شود. محاسبه مقادیر ویژه با استفاده از رابطه (۱۲) باعث می‌شود که فیلتر انتشار تانسوری همزمان با تضعیف نوفه به بهبود همدوسی ساختارها کمک نماید. در شکل ۳ الگوریتم فیلتر انتشار تانسوری به منظور انجام فرآیند نوفه‌زدایی یک تصویر دوبعدی نشان داده شده است.

الگوریتم فیلتر انتشار غیرخطی تانسوری

ورودی: تصویر دو بعدی یا داده لرزه‌ای آلوده به نوفه تصادفی

خروجی: تصویر یا داده تضعیف نوفه شده

پارامترهای اولیه: نوع فیلتر انتشار، انحراف معیار فیلتر گاوسی ρ و σ ، گام زمانی،

ماتریس همدوسی و تعداد تکرار یا زمان انتشار

تا زمانی که: تعداد تکرارها به مقدار تعیین شده برسد، انجام بده

(۱) اعمال یک فیلتر گاوسی با انحراف معیار σ روی تصویر ورودی

(۲) محاسبه تانسور ساختاری گرادیان

(۳) اعمال یک فیلتر گاوسی با انحراف معیار ρ روی تانسور ساختاری گرادیان

(۴) محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه تانسور ساختاری گرادیان

(۵) محاسبه تانسور انتشار

(۶) به روز رسانی تصویر از رابطه انتشار گسسته سازی شده

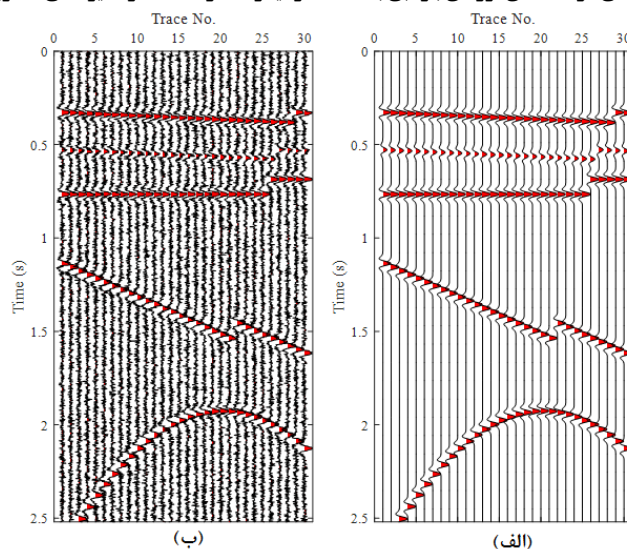
پایان الگوریتم

شکل ۳: الگوریتم فیلتر انتشار غیرخطی تانسوری.

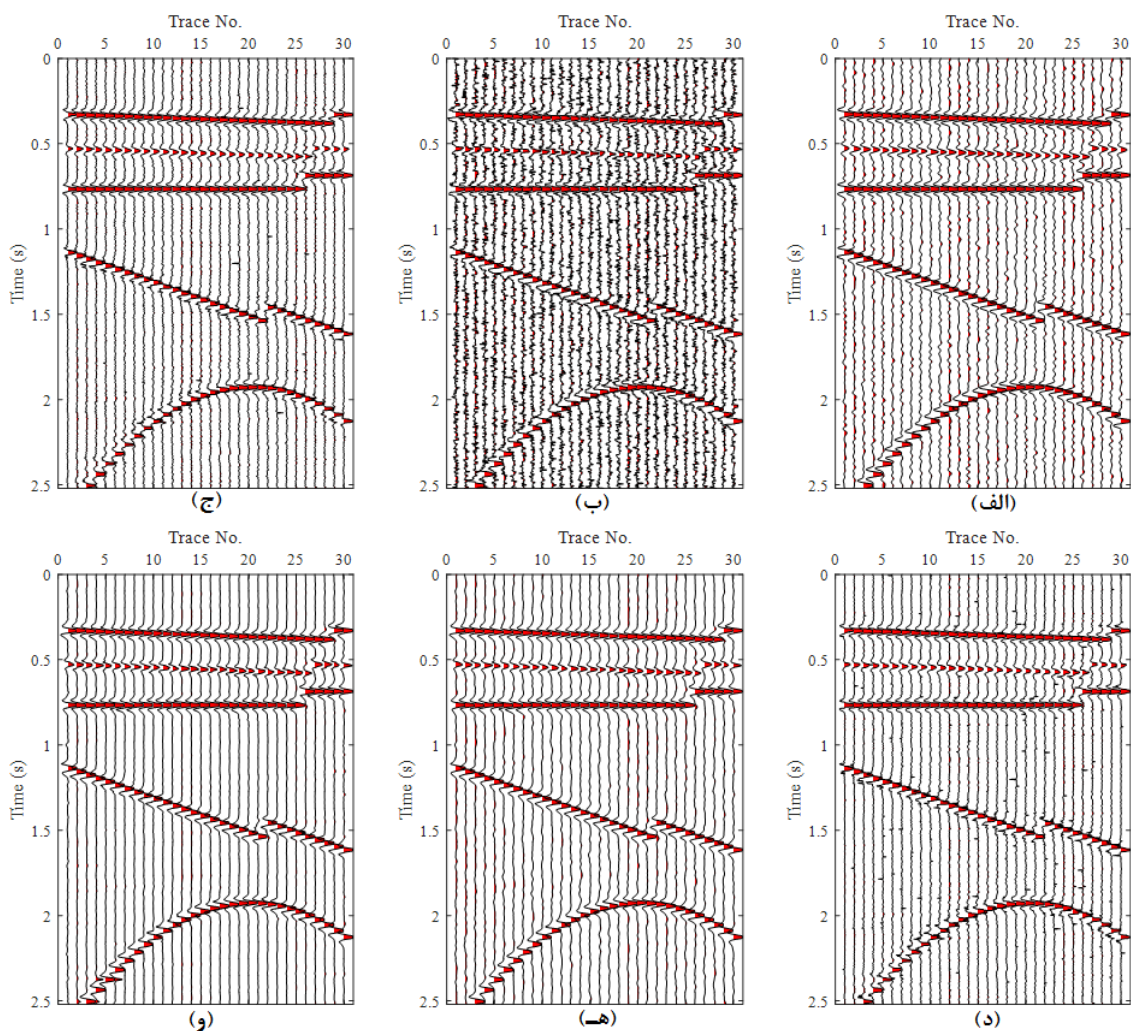
۳- داده مصنوعی

به منظور بررسی کارایی این روش در تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای بازتابی، یک مقطع لرزه‌ای مصنوعی دو بعدی تولید گردید. مقطع مذکور دارای ۳۰ ردلرزه با طول زمانی ۲/۵ ثانیه است؛ که با گام ۲ میلی‌ثانیه نمونه‌برداری شده است. موجک مورد استفاده در ساخت داده لرزه‌ای مصنوعی از نوع موجک ریکر با فرکانس غالب ۱۵ هرتز است. همان‌طور که در شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود، این داده شامل سه رویداد با شیب‌های متفاوت و کم با دامنه متفاوت، یک رویداد با شیب زیاد و یک رویداد منحنی است؛ که تمامی رویدادهای خطی با یک شکستگی همراه شده‌اند. داده لرزه‌ای مصنوعی به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه‌های مختلف آغشته گردید؛ که در شکل ۴ (ب) داده لرزه‌ای آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۱ دسی‌بل نشان داده شده است. بر روی مقاطع لرزه‌ای مصنوعی آغشته به نوفه با نسبت‌های سیگنال به نوفه مختلف، الگوریتم‌های فیلتر انتشار مدل پرونا و مالیک با دو تابع انتشار معرفی شده در روابط (۳) و (۴) و فیلتر انتشار تانسوری با دو رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود

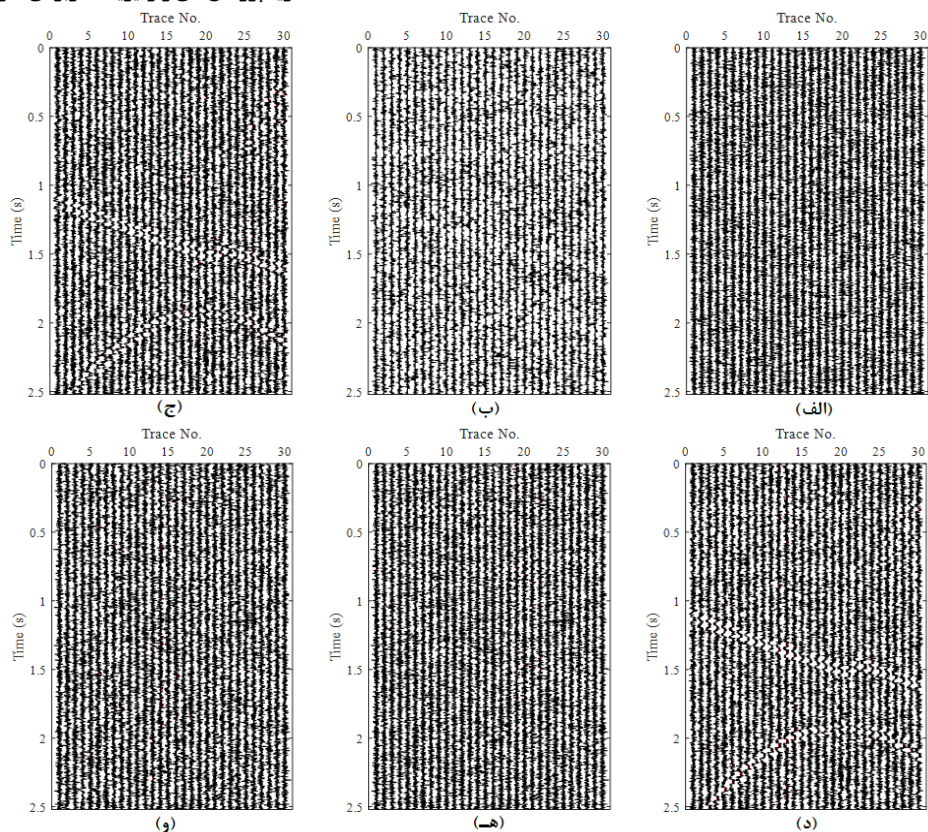
شکفته زواری و همکاران، تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی با استفاده از فیلتر انتشار ناهمسانگرد غیرخطی تانسوری، صفحات ۱۰۵-۱۱۸.



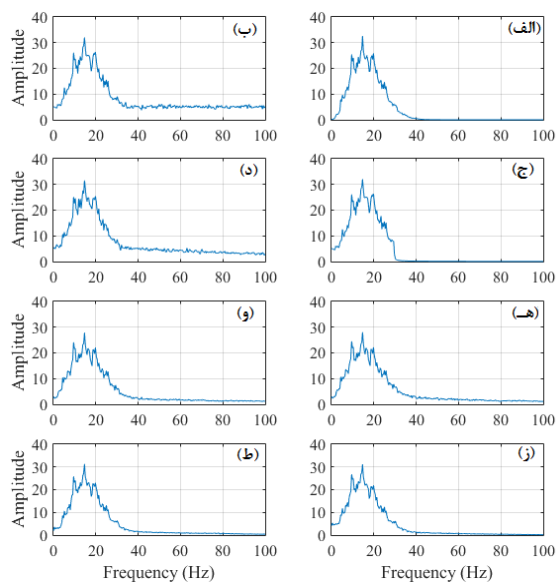
شکل ۴: (الف) مقطع لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه، (ب) مقطع لرزه‌ای مصنوعی آغشته شده به نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۱ دسی‌بل.



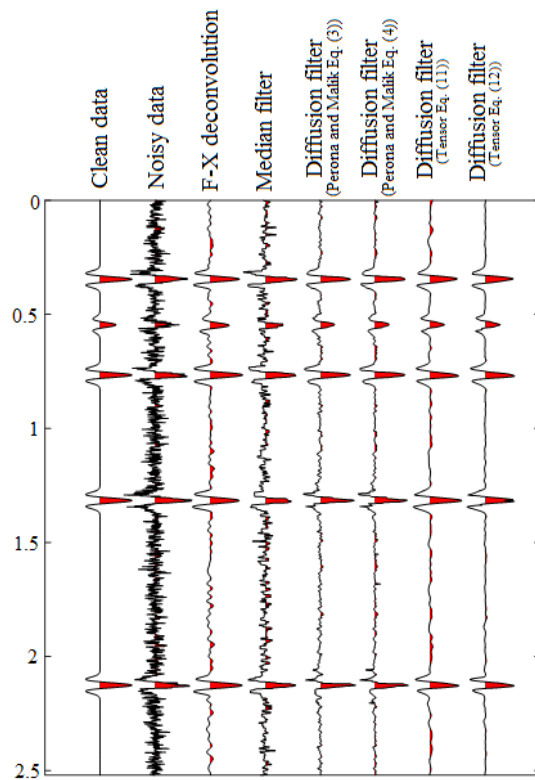
شکل ۵: نتایج نوفه‌زدایی با استفاده از روش (الف) واهمامیخت $f-x$ ، (ب) میانه، (ج) و (د) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ه) و (و) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.



شکل ۶: مقطع تفاضل میان مقطع ورودی و مقطع نوفه‌زدا شده با استفاده از روش (الف) واهمامیخت $f-x$ ، (ب) میانه، (ج) و (د) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ه) و (و) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.



شکل ۸: طیف دامنه میانگین داده مصنوعی بدون نوفه و آغشته به نوفه و طیف دامنه میانگین مقطع نوفه‌زدا شده با استفاده از روش (ج) واهمامیخت $f-x$ ، (د) میانه، (ه) و (و) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ز) و (ط) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.

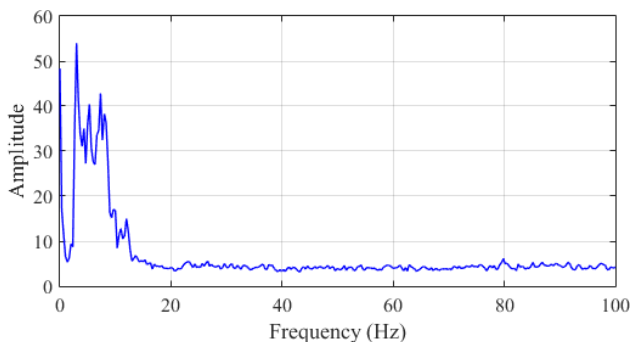


شکل ۷: مقایسه ردلرزه دهم مقاطع خروجی در روش‌های مختلف نوفه‌زدایی.

داده لرزه‌ای واقعی قبل و بعد از نوفه‌زدایی در شکل ۱۳ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های مورد استفاده برای تضعیف نوفه تأثیر مخربی بر روی رویدادهای بازتابی نداشته‌اند. در شکل ۱۴ طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای واقعی قبل و بعد از نوفه‌زدایی با روش‌های مورد بررسی رسم شده؛ که موفقیت چشم‌گیر روش فیلتر انتشار تانسوری در تضعیف نوفه را در مقایسه با سایر روش‌ها به طور واضحی نشان می‌دهد.

۵- بحث

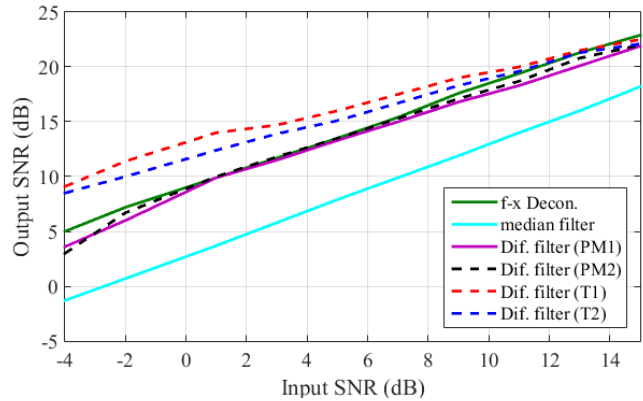
اجرای روش فیلتر انتشار به منظور تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی نیازمند تعیین مقدار تعدادی پارامتر جهت کنترل فرآیند انتشار است که توسط کاربر تعیین می‌شوند. در نوع فیلتر انتشار اسکالر که به مدل پرونا و مالیک نیز نامیده می‌شود، پارامترهای مورد نیاز شامل نوع تابع انتشار، پارامتر آستانه گرادیان، گام زمانی و تعداد تکرار است. همان‌طور که در نتایج داده مصنوعی و واقعی مشاهده گردید، نوع تابع انتشار (روابط (۳) و (۴)) تأثیر چندانی بر روی عملکرد فیلتر انتشار اسکالر ندارد و خروجی دو تابع انتشار مذکور تفاوت چشمگیری نسبت به یکدیگر ندارند.



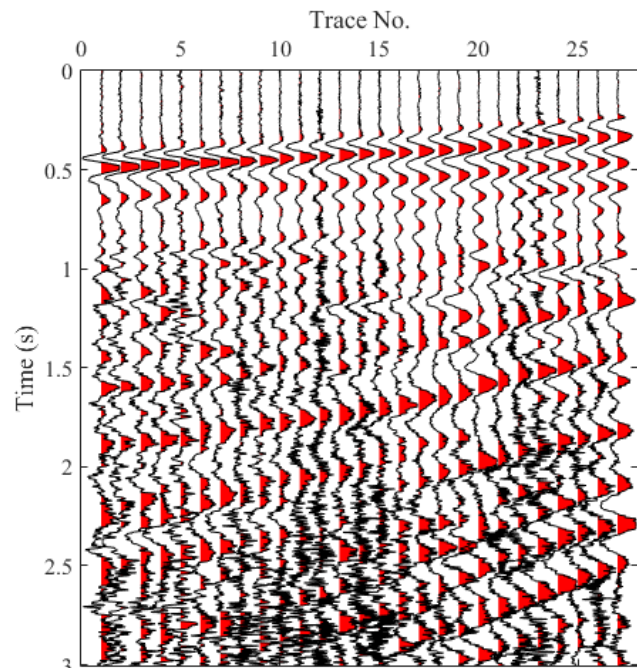
شکل ۱۱: طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای واقعی.

پارامتر آستانه گرادیان، در واقع پارامتری است که محل لبه را برای الگوریتم مشخص می‌کند؛ تا هموارسازی کمتری در آن محل صورت پذیرد. گرادیان‌های بیشتر از پارامتر آستانه گرادیان معرف لبه می‌باشند. این پارامتر به تصویر ورودی وابسته است و معمولاً به صورت تطبیقی تعیین می‌شود. مقدار گام زمانی به دلیل احتمال ناپایدار شدن سیستم حل معادلات بهتر است کمتر از ۰/۲۵ ثانیه در نظر گرفته شود (Perona and Malik, 1987)، اما تعداد تکرارها بر مبنای هدف از اعمال فیلتر انتشار به صورت سعی و خطا تعیین می‌گردد. هر چه تعداد تکرار بیشتر در نظر گرفته شود، در مقابل تضعیف نوفه تصادفی بیشتر احتمال هموارسازی بیش از حد لبه‌ها وجود خواهد داشت.

در روش فیلتر انتشار ناهمسانگرد غیرخطی یا مدل تانسوری، اولین پارامتر مهم، نوع فیلتر (بهبود دهنده لبه یا بهبود دهنده



شکل ۹: نمودار نسبت سیگنال به نوفه ورودی به خروجی.



شکل ۱۰: داده لرزه‌ای واقعی مورد استفاده.

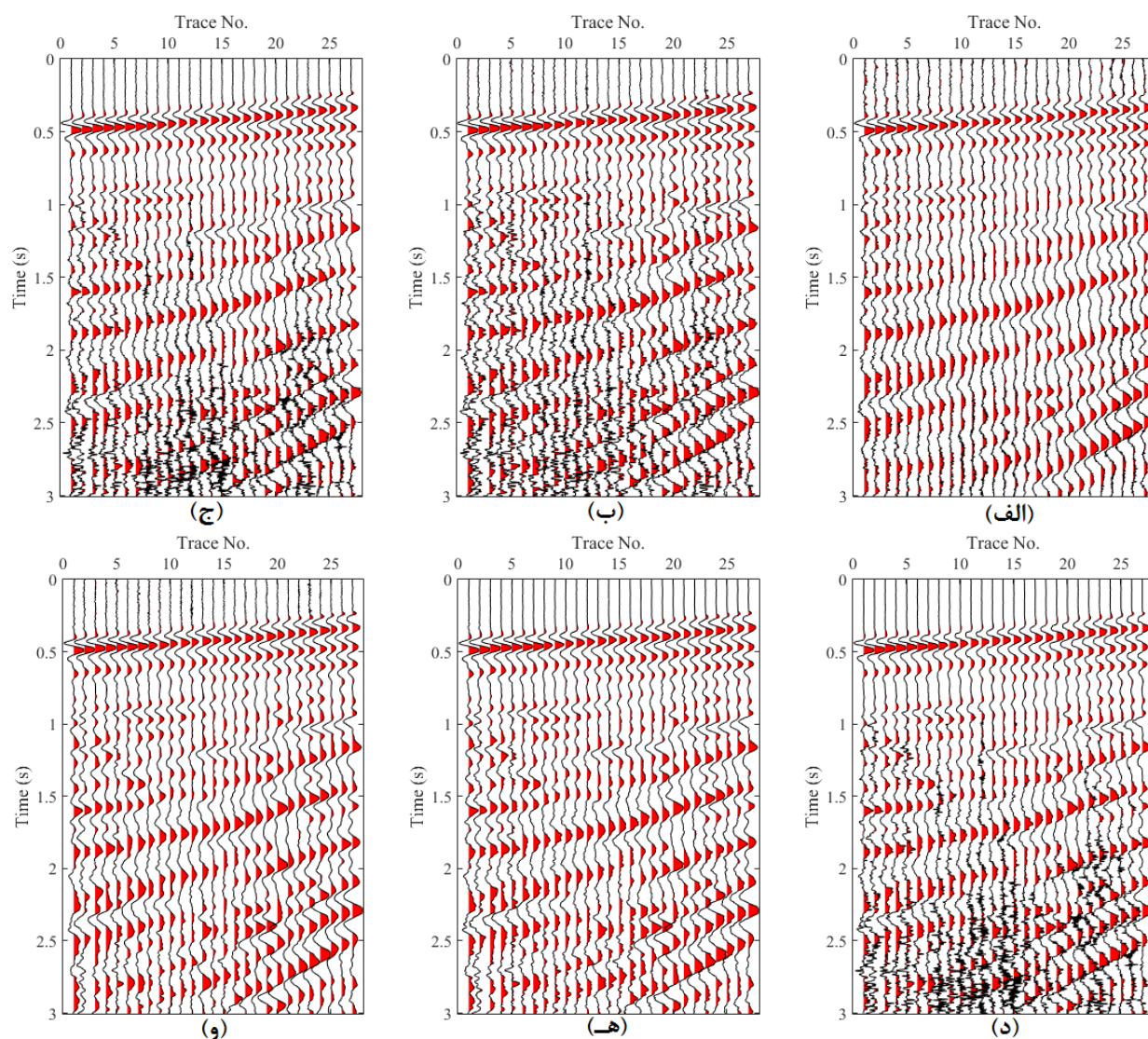
۴- داده واقعی

به منظور بررسی کارایی روش فیلتر انتشار در تضعیف نوفه تصادفی داده لرزه‌ای واقعی، قسمتی از یک مقطع لرزه‌ای دو بعدی که به شدت به نوفه آغشته است، انتخاب گردید. داده مذکور حاوی ۲۷ ردلرزه است؛ که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ طیف دامنه میانگین داده لرزه‌ای واقعی رسم شده است؛ که حضور نوفه در آن مشهود است. به منظور تضعیف نوفه الگوریتم‌های فیلتر انتشار پرونا و مالیک و تانسوری بر روی داده لرزه‌ای واقعی اعمال گردید و نتایج حاصل با نتایج دو روش متداول واهم‌مخت $f-x$ و فیلتر میانه مقایسه گردید؛ که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فیلتر انتشار تانسوری با دو رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده هم‌دوسی دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها است. برای مقایسه بیشتر، مقاطع تفاضل بین

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ۱۳۹۴.

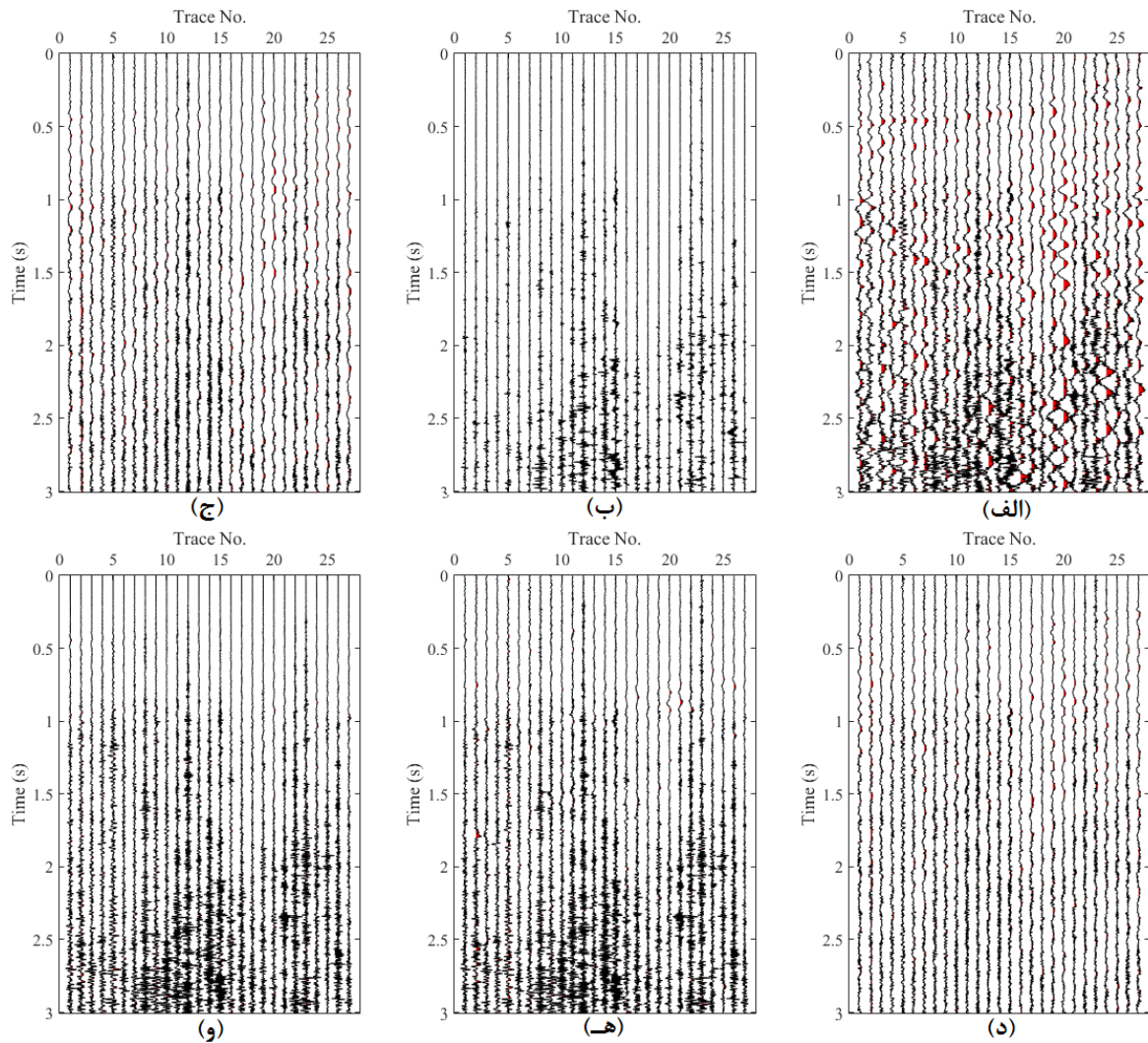
این مقاله مقدار 0.15 انتخاب شد. این مقادیر در طول آزمایش برای هر تصویر ثابت نگه داشته شده‌اند. در نهایت پارامتر کلیدی و مهم تعداد تکرار که معادل مدت زمان انتشار است، باید توسط کاربر متناسب با شرایط از قبیل سطح نوفه انتخاب گردد. در این مقاله مدت زمان انتشار برای مدل بهبود دهنده همدوسی مقدار $9/9$ و برای مدل بهبود دهنده لبه مقدار $14/8$ انتخاب شد. انتخاب مقدار این پارامتر همان‌گونه که در مورد مدل اسکالر فیلتر انتشار بیان شد، به صورت سعی و خطاست.

همدوسی) است؛ که برای ساخت تانسور انتشار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله به منظور پیاده‌سازی نوع بهبود دهنده لبه فیلتر انتشار تانسوری مقدار m برابر ۴ و مقدار C_m برابر $3/31488$ در نظر گرفته شد. همچنین برای پیاده‌سازی نوع بهبود دهنده همدوسی فیلتر انتشار تانسوری مقدار α برابر 0.01 و مقدار m برابر ۲ در نظر گرفته شد. پارامتر گام زمانی همانند آنچه که در مورد نوع اسکالر فیلتر انتشار بیان شد، باید کوچک‌تر از 0.25 در نظر گرفته شود؛ تا احتمال ناپایداری سیستم معادلات کاهش یابد؛ که در

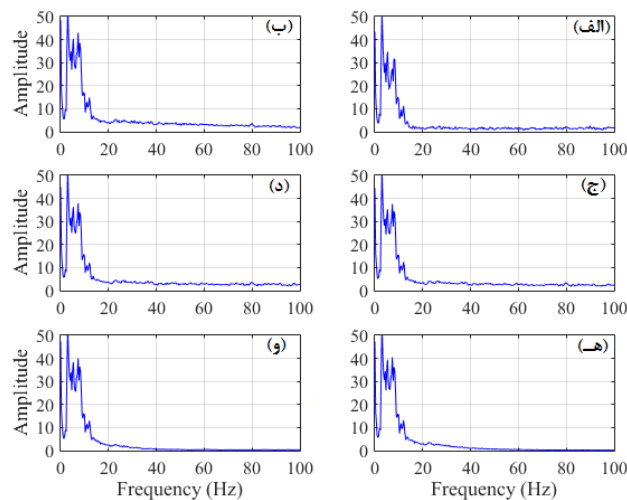


شکل ۱۲: نتایج نوفه‌زدایی داده واقعی لرزه‌ای با استفاده از روش (الف) واهمامیخت $f-x$ ، (ب) میانه، (ج) و (د) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ه) و (و) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.

شکته زوارم و همکاران، تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازنمایی با استفاده از فیلتر انتشار ناهمسانگرد غیرخطی تانسوری، صفحات ۱۰۵-۱۱۸.



شکل ۱۳: مقطع تفاضل میان مقطع ورودی و مقطع نوفه‌زدا شده در داده لرزه‌ای واقعی با استفاده از روش (الف) واهمامیخت $f-x$ ، (ب) میانه، (ج) و (د) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ه) و (و) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.



شکل ۱۴: طیف دامنه میانگین مقطع نوفه‌زدا شده با استفاده از روش (الف) واهمامیخت $f-x$ ، (ب) میانه، (ج) و (د) فیلتر انتشار پرونا و مالیک به ترتیب با توابع انتشار روابط (۳) و (۴)، (ه) و (و) فیلتر انتشار تانسوری به ترتیب با رویکرد بهبود دهنده لبه و بهبود دهنده همدوسی.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از فیلتر انتشار که مبتنی بر مفهوم فیزیکی انتشار است، به منظور تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی استفاده شده است. فیلتر انتشار به دلیل خاصیت هموارسازی قادر به تضعیف نوفه‌های تصادفی است. در فیلترهای انتشار، ضریب انتشار فرایند انتشار یا هموارسازی را کنترل می‌کند. این ضریب می‌تواند به صورت عدد ثابت، تابع اسکالر و یا یک تانسور در نظر گرفته شود. چنانچه ضریب انتشار یک مقدار ثابت باشد، باعث می‌شود که فرایند هموارسازی به صورت همگن و همسانگرد عمل نماید و تصویر خروجی تار شود. به همین دلیل از این حالت نمی‌توان در تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای استفاده نمود. اگر ضریب انتشار به صورت تابع اسکالر تعریف شود، فرایند هموارسازی به صورت همگن نخواهد بود؛ ولی همچنان همسانگرد عمل می‌نماید. در این حالت، تضعیف نوفه در محلی که مرز وجود نداشته باشد، به خوبی صورت می‌پذیرد؛ اما در موقعیت مرز یا لبه یا فرایند تضعیف نوفه به خوبی انجام نمی‌شود و یا لبه موجود نیز دچار هموارسازی می‌شود. در داده‌های لرزه‌ای بازتابی به دلیل حضور رویدادهای بازتابی به صورت لبه، این نوع فیلتر انتشار نیز عملکرد بسیار خوبی از خود نشان نمی‌دهد. در حالتی که ضریب انتشار به صورت یک تانسور تعریف شود، فیلتر انتشار به صورت غیر همگن و ناهمسانگرد عمل می‌کند و در راستای عمود بر لبه و موازی آن دارای میزان هموارسازی متفاوتی خواهد بود. این خاصیت ضمن تضعیف حداکثری نوفه تصادفی، لبه‌ها را نیز حفظ خواهد نمود. نتایج حاصل از نوفه‌زدایی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی کارایی بسیار خوب فیلتر انتشار تانسوری را در تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای بازتابی در مقایسه با دو روش متداول واهمامیخت $f-x$ و فیلتر میانه را نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای تضعیف نوفه تصادفی داده‌های لرزه‌ای بازتابی همراه با حفظ لبه‌ها در نظر گرفته شود.

۷- منابع

- AlBinHassan, N.M., Luo, Y. and Al-Faraj, M.N., 2006, 3D edge-preserving smoothing and applications, *Geophysics*, 71 (4), P5-P11.
- Baddari, K., Ferahtia, J., Aïfa, T. and Djarfour, N., 2011, Seismic noise attenuation by means of an anisotropic non-linear diffusion filter, *Computers & Geosciences*, 37 (4), 456-463.
- Bokstein, B.S., Srolovitz, D.J. and Mendelev, M.I., 2005, *Thermodynamics and kinetics in materials science*, Oxford Univ. Press.
- Bonar, D. and Sacchi, M., 2012, Denoising seismic data using the nonlocal means algorithm, *Geophysics*, 77 (1), A5-A8.
- Dangeti, S. 2003, Denoising techniques-a comparison, Master of Science in Electrical Engineering, Louisiana State University.
- Deng, X., Ma, H., Li, Y. and Zeng, Q., 2015, Seismic Random Noise Attenuation Based On Adaptive Time-Frequency Peak Filtering, *Journal of Applied Geophysics*, 113, 31-37.
- Enli, W. and Gaohan, Y., 2013, Diffusion Filtering for Seismic Data Enhancement, 83th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1580-1586.
- Freire, S.L. and Ulrych, T.J., 1988, Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling: *Geophysics*, 53 (6), 778-785.
- Hagen, D.C., 1982, The application of principal components analysis to seismic data sets, *Geoexploration*, 20 (1), 93-111.
- Haghshenas Lari, H. and Gholami, A., 2014, Curvelet-TV regularized Bregman iteration for seismic random noise attenuation, *Journal of Applied Geophysics*, 109, 233-241.
- Hatton, L., Worthington, M. and Makin, J., 1991, *Seismic data processing*, Wiley.
- Hornbostel, S. and Bishop, G., 1990, Background restoration of dip-filtered data, *Geophysics*, 55 (2), 249-253.
- Imhof, M.G., 2003, Enhancing seismic images using anisotropic nonlinear diffusion, 73th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1763-1766.
- Jones, I. and Levy, S., 1987, Signal-to-noise ratio enhancement in multichannel seismic data via the karhunen-loève transform, *Geophysical prospecting*, 35 (1), 12-32.
- Kroon, D. J., 2011, Segmentation of the mandibular canal in cone-beam CT data, *Citeseer*.
- Miao, X. and Cheadle, S., 1998, Noise attenuation with wavelet transforms, 56th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1072-1075.
- Perona, P. and Malik, J., 1987, Scale space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Comp. Soc. Workshop on Computer Vision*, 16-22.
- Perona, P. and Malik, J., 1990, Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12 (7), 629-639.
- Proakis, J.G. and Manolakis, D.G., 2007, *Digital signal processing*, Pearson Prentice Hall.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1995, *Exploration seismology*, Cambridge University Press.
- Trickett, S., 2008, F-xy Cadzow noise suppression, 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2586-2590.

- Witkin, A.P., 1983, Scale-space filtering, 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1019-1021
- Witkin, A.P., 1984, Scale-space filtering, A new approach to multi-scale description, 84th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 150-153.
- Yilmaz, Ö. and Doherty, S.M., 2001, Seismic data analysis, processing, inversion, and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists.
- Trickett, S.R., 2003, F-xy eigenimage noise suppression, Geophysics, 68 (2), 751-759.
- Ursin, B. and Zheng, Y., 1985, Identification of seismic reflections using singular value decomposition, Geophysical prospecting, 33 (6), 773-799.
- Weickert, J., 1998, Anisotropic diffusion in image processing. Vol. 1, Teubner Stuttgart.
- Weickert, J., 1999, Coherence-enhancing diffusion filtering, International Journal of Computer Vision, 31 (2-3), 111-127.



Reflection seismic random noise attenuation using non-linear diffusion tensor anisotropic filtering

Mohamad Shekofteh Zoeram¹, Amin Roshandel Kahoo^{2*} and Hadi Grailu³

1- M.Sc. Graduated, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, School of Electrical & Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 15 January 2016; Accepted: 1 May 2016

Corresponding author: roshandel@shahroodut.ac.ir

Keywords

Reflection Seismic Data
Random Noise
Noise Attenuation
Image Processing
Non-Linear Anisotropic Diffusion
Filter

Extended Abstract

Summary

Reflection seismology is one of the exploration geophysical methods which uses the principles of seismology to estimate the properties of the earth subsurface from reflected seismic waves. It is a type of geophysical imaging technique used to image the subsurface of the earth and understand its geology. Seismic data acquisition always is accompanied by variety of noises. Therefore, improvement of the signal-to-noise ratio (SNR) of seismic data is a sticky thread in the

processing of seismic data for high quality imaging. Many efforts have been made to remove this type of noise from seismic data and several authors have suggested different methods for this purpose. Each of these methods has its own advantages and disadvantages. In this paper, we have used non-linear diffusion filter to attenuate the reflection seismic random noise. The results pointed out in this paper show significant improvement of SNR through enhanced reflector continuity for a better interpretation. They show that the diffusion filter produces acceptable results compared to the well-known f-x deconvolution and median filter.

Introduction

Seismic data are affected by various types of noises such as ground rolls, multiples and etc. Generally, seismic noises are divided into two categories: coherent and incoherent. Unlike the coherent noise, incoherent noise known as random noise, is not correlated from trace to trace. Random noise resulted from random oscillation during acquiring data is one of the most important and harmful noises that exist in seismic data over entire time and frequency. Therefore, improvement of the signal-to-noise ratio (SNR) of seismic data is a sticky thread in the processing of seismic data for high quality imaging. Many efforts have been made to remove this type of noise from seismic data and several authors have suggested different methods, such as f-x filtering, polynomial fitting, and singular value decomposition, to remove random noise from seismic data. Each of these methods has its own advantages and disadvantages. A significant part of the seismic random noise can be attenuated by stacking procedure, but part of random noise also remains after stacking. Attenuation of remaining part of noise requires an advanced method. Smoothing filter is one of the most efficient and traditional type of random noise suppression in signal and images. Diffusion filter is one of the most important smoothing filters, which is based on a physical concept named as diffusion.

Methodology and Approaches

The diffusion defines a physical procedure for balancing concentration changes without creating or destroying mass. The analogy with image processing can be drawn if we consider the concentration as the intensity of the image. The diffusion coefficient or diffusivity function, which adaptively controls the smoothing amount is one of the most effective parameters in diffusion process. If the diffusion coefficient is selected as a constant value, the diffusion process will be linear. In other words, the smoothing procedure will be performed as homogeneous and isotropic and causes the output image to be blurry. If the diffusion coefficient is a function of image gradient, the diffusion process will be scalar. In these circumstances, the smoothing procedure will be performed as inhomogeneous and isotropic. Scalar diffusion filter has better efficiency than the linear form; however, it has not good performance in the edge position due to its isotropic property. Anisotropic non-linear diffusion filter is a proper tool to filter images while preserving details and even enhancing edges. The diffusion coefficient of an anisotropic non-linear diffusion filter is defined as tensor. The basic idea of the anisotropic non-linear diffusion filter is to preserve edges. This is attained by

orienting the diffusion process parallel to the edge.

Results and Conclusions

The anisotropic non-linear diffusion filter is a powerful method for image de-noising and edge preserving. The efficiency of the diffusion filter was tested on both real and synthetic seismic data. The method effectively recovered seismic signals on noisy synthetic and field seismic data. The obtained results were compared with the results of the well-known f-x deconvolution and median filter. After analyzing all of the results, the anisotropic non-linear diffusion filter proved to be an alternative algorithm for seismic data de-noising and had the best performance among the other three filter methods.
