

نرم کردن شرایط تصویرسازی و مدل کردن تغییرات جانبی سرعت در تصویرسازی به روش اشعه گاوسی

مهرداد سلیمانی^{۱*} و سمیه محمدی^۲

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

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۸

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

واژگان کلیدی

چکیده

شرایط تصویرسازی در روش های مبتنی بر انتشار میدان موج چشمه و گیرنده، شامل برابری زمان انتشار موج چشمه و گیرنده در محل تلاقی آن ها و تمرکز جبهه موج پس انتشار داده شده از گیرنده به نقطه تصویرسازی، هر دو در محل تصویرسازی است. پیچیدگی ساختارهای زمین شناسی و تغییرات سرعت انتشار موج در محیط، برقراری شرایط تصویرسازی را با دشواری روبرو می کند. بدین منظور روش های مختلفی جهت برقراری شرایط تصویرسازی با وجود مشکلات اشاره شده، معرفی گردید. در این تحقیق، روش تصویرسازی اشعه گاوسی به منظور معرفی استراتژی جدیدی به منظور تغییر آن ها در حضور تغییرات شدید جانبی سرعت انتخاب گردید. استراتژی معرفی شده، استفاده از تکنیک نرم کردن شرایط تصویرسازی در روش تصویرسازی اشعه گاوسی است. در این تحقیق، عملکرد تصویرسازی اشعه گاوسی به گونه ای تغییر داده شد؛ که بتواند تغییرات جانبی سرعت را تحمل کند. این مهم به کمک مزیت استفاده از اشعه حاصل می شود که نیازی به ردیابی پرتو یا انتشار جبهه موج گیرنده تا زمان از پیش تعیین شده ای نیست. در این حالت جبهه موج پس انتشار داده شده الزاماً یک جبهه موج منظم هندسی نخواهد بود، بلکه با توجه به تغییرات جانبی سرعت، هر شکلی می تواند باشد. روش مذکور بر روی یک داده مصنوعی بدون نوفه و آغشته به نوفه و یک داده واقعی با تغییرات جانبی سرعت پیاده گردید. نتایج نشان داد که با نرم کردن شرایط تصویرسازی در روش تصویرسازی اشعه گاوسی در حضور تغییرات جانبی سرعت، قابل قبول خواهد بود.

کوچ اشعه گاوسی
تئوری پرتو
تصویرسازی لرزه ای
تغییرات جانبی سرعت

۱- مقدمه

در روش‌های تصویرسازی بر مبنای انتشار جبهه موج، مقطع لرزه‌ای دورافت صفر با تصویرسازی در هر نقطه دلخواه از محیط انتشار حاصل می‌شود. در این فرایند، نقطه تصویرسازی بر روی بازتابنده انتخاب شده و جبهه موج چشمه، از محل چشمه تا سطح بازتابنده انتشار داده شده و موج دریافتی در گیرنده، از سطح تا محل نقطه تصویرسازی، پس انتشار داده می‌شود (شکل ۱- الف). ضریب بازتاب در نقطه تصویرسازی، توسط رابطه زیر حاصل می‌شود (Guittou et al., 2007):

$$I_{rc}(x) = \sum_{x_s} \sum_{\omega} \frac{U(\omega, x, x_s)}{D(\omega, x, x_s)} \quad (1)$$

که در آن $x=[x,y,z]$ محل نقطه تصویرسازی است، ω فرکانس زاویه‌ای و $x_s=[x,y,z]$ محل چشمه است. پارامترهای (U) و (D) به ترتیب میدان موج بالارونده (گیرنده) و میدان موج پایین‌رونده (چشمه) است. از نظر فیزیکی بیان می‌شود که میدان موج در نقطه‌ای قرار دارد؛ که میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده بر یکدیگر منطبق هستند (Guittou et al., 2007). انطباق میدان‌های موج چشمه و گیرنده به عنوان شرط اساسی تصویرسازی شناخته می‌شود. این انطباق در دو حالت انطباق زمانی و جبهه موج بررسی می‌شود. بدین منظور در فرایند تصویرسازی به شکل انتشار میدان موج، جبهه موج گیرنده به شکل معکوس از سطح به نقطه تصویرسازی انتشار داده می‌شود. در ادامه نقاطی در میدان موج پس انتشار داده شده که زمان پایانی پس انتشار آن‌ها (از سطح تا نقطه تصویرسازی با شروع از زمان ثبت در گیرنده و کاهش زمان با پشروی موج) برابر با صفر می‌شود، به عنوان نقاط دارای شرط تصویرسازی انتخاب می‌شوند (Nita, 2006). شرط دیگر تصویرسازی، تمرکز یافتن جبهه موج بازگشتی از سطح به نقطه تصویرسازی است. در صورتی که فرایند پس انتشار جبهه موج گیرنده از سطح به نقطه تصویرسازی دقیقاً در محل نقطه تصویرسازی متمرکز شود، شرط دیگر تصویرسازی برقرار است (Jones, 2014). پس از برقراری شرایط تصویرسازی، نقطه مورد نظر با همبستگی عرضی جبهه موج چشمه و گیرنده در حوزه زمان و با زمان تأخیر صفر، تصویر در نقطه مورد نظر حاصل می‌شود.

در شرایطی که در معادله (۱)، عبارت کلی میدان موج چشمه نزدیک و یا برابر صفر باشد، تصویرسازی ناپایدار خواهد شد. بدین منظور معادله (۱) در مزدوج مختلط میدان موج چشمه ضرب شده و ضریب پایدارکننده ε ، به مخرج اضافه می‌شود (Guittou et al., 2007):

$$I_{rc}(x) = \sum_{x_s} \sum_{\omega} \frac{U(\omega, x, x_s) + D'(\omega, x, x_s)}{D(\omega, x, x_s) + D'(\omega, x, x_s) + \varepsilon} \quad (2)$$

شرایط تصویرسازی همچنین در صورت حضور تغییرات شدید

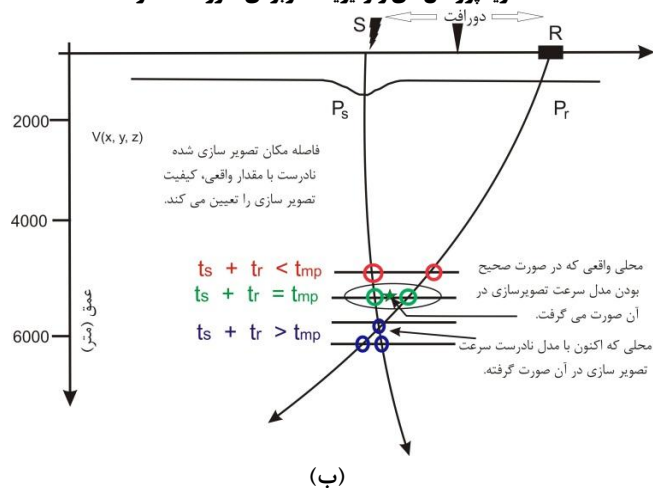
جانبی سرعت در محیط انتشار موج فراهم نمی‌شود و یا با خطای بالایی همراه خواهد بود. به بیان دیگر، شرایط تصویرسازی در محلی غیر از نقطه تصویرسازی فراهم می‌شود (شکل ۱- ب). بدین ترتیب هم‌ارزی مقطع دور افت صفر شبیه سازی شده و مقطع دورافت صفر واقعی، کامل نخواهد بود و تصویر به دست آمده، بدون تمرکز رخدادها در محل واقعی‌شان است (MacKay and Abma, 1992). Pon and Lines (2004) نشان دادند که خطاهای سیستماتیک در مدل سرعت، تأثیر بیشتری در اغتشاش تصویر نهایی، نسبت به خطاهای اتفاقی خواهد داشت.

به منظور حذف خطای تمرکز، می‌توان از روش‌هایی در تصویرسازی لرزه‌ای استفاده کرد که حل معادله میدان موج در آن‌ها وابستگی کمتری به تغییرات سرعت موج در محیط داشته باشد. به عنوان مثال، Fomel (2007) نشان داد که با تخمین شیب‌های محلی در داده‌های پیش از برانبارش، می‌توان نیاز به اطلاعات دقیق سرعت، به تصویرسازی لرزه‌ای در حوزه زمان پرداخت. در واقع Fomel (2007) بیان داشت که شیب‌های محلی در داده‌های لرزه‌ای، حاوی تمامی اطلاعات لازم در مورد هندسه بازتابنده است. Luo (2012) پیشنهاد کرد که به منظور افزایش دقت در تصویرسازی نهایی و کاهش اثر خطاهای سرعت در تصویرسازی لرزه‌ای، به جای کاهش اختلاف بین مقدار مشاهده‌ای و مقدار تخمین زده شده پارامتر میدان موج در روند به روز رسانی مدل سرعت، بهتر است اختلاف بین مقدار تخمین زده شده و مقدار مشاهده‌ای با جابجایی زمانی را به حداقل رساند. میزان جابجایی زمانی در این روش، برابر اختلاف زمان سیر بین مقدار تخمینی و مقدار مشاهده‌ای است.

۲- تأثیر مدل سرعت در تصویرسازی لرزه‌ای

با فرض داشتن مدل سرعت انتشار دقیق، می‌توان پارامترهای میدان موج (یا پارامترهای پرتو) در حوزه پاسخ لرزه‌ای را محاسبه کرد. بنابراین

می‌توان زاویه خروجی پرتوی مرکزی را محاسبه و رفتار جبهه موج در تمام مدل سرعت در طول نیمی از زمان دور افت صفر که در پاسخ لرزه‌ای برداشت شده است را بررسی کرد. لذا با در نظر گرفتن فرض دورافت صفر، کافی است میدان موج در نصف زمان ثبت شده، در مدل سرعت انتشار داده شود. در صورتی که مجموعه‌های مختلفی از دسته پرتوهای جبهه موج به شکل متقاطع در آیند (در حالت غیر دورافت صفر)، در آن حالت تخمین مکان دقیق تصویرسازی با دشواری رو به رو خواهد شد (Protasov and Tcheverda, 2011). شکل ۱- ب نمونه‌ای از این حالت که به دلیل نادرست بودن مدل سرعت ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. در این شکل، مکانی که شرط



(ب)

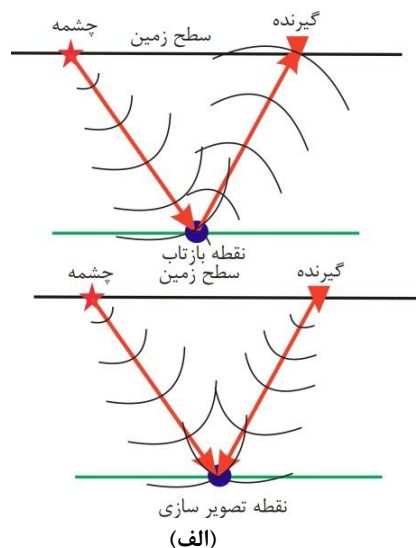
شکل ۱: الف) نقطه بازتاب بر روی بازتابنده که به عنوان نقطه تصویرسازی انتخاب می‌شود و جبهه‌های موج چشمه و گیرنده در آن نقطه بایستی بر یکدیگر منطبق باشند (Shabelansky, 2015).
 ب) در صورت نادرست بودن میدان سرعت، جبهه‌های موج در نقطه‌ای خارج از نقطه تصویرسازی بر یکدیگر منطبق خواهند شد. به منظور ساده‌سازی، جبهه‌های موج نشان داده نشده‌اند (Robein, 2010).

به منظور برطرف کردن این مشکل Sava and Fomel (2006) روش تصویرسازی با جابجایی زمانی را پیشنهاد دادند. در این روش به جای همبستگی عرضی جبهه موج چشمه و گیرنده در زمان تأخیر صفر، این فرایند با جابجایی زمانی صورت می‌گیرد. بدین ترتیب تصاویر با زمان تأخیرهای متفاوت در مقابل جابجایی مکانی چشمه و گیرنده نسبت به یکدیگر، به دست آمده که میزان عدم تمرکز در آن‌ها، بیانگر میزان خطای مدل سرعت است. سپس برای هر مقطع، برداشت چشمه مشترک به عنوان تابعی از جابجایی زمانی و یا زاویه بازتاب به دست می‌آید. در نهایت با آنالیز برداشت‌های چشمه مشترک، خطای مدل سرعت، تصحیح شده و تصویرسازی نهایی انجام می‌گیرد. با این وجود، روش مذکور، دامنه میدان موج را تغییر داده و فرایند به روز رسانی مدل سرعت در آن، بسیار زمان بر و دشوار است. Ng (2007) با اضافه کردن فرایند درونیابی بین نقاط با شرایط تصویرسازی و انجام محاسبات در حوزه فرکانس، زمان پردازش در تکنیک کوچ به روش ادامه فروسو را کاهش داد. این تکنیک تنها در روش ادامه فروسو قابل کاربرد است.

Guitton et al. (2007) با اعمال عملگر هموارسازی بر روی میدان موج چشمه، شرایط تصویرسازی را نرم کردند. این فرایند، به نام نرم کردن شرط تصویرسازی شناخته می‌شود. استراتژی مذکور، نیاز به فاکتور میرا کننده را از بین برده و همچنین در شرایط حضور نوفه نیز کارایی مناسبی از خود نشان می‌دهد. با این حال در شرایط وجود تغییرات شدید جانبی سرعت، نیاز به هموارسازی بالایی است که شرایط تصویرسازی را از حالت واقعی خود، دور خواهد کرد. در

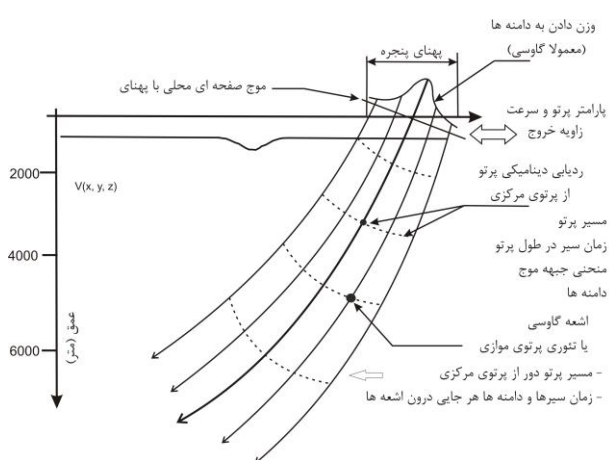
تصویرسازی $(t_s + t_r = t_{mp})$ در آن حاصل شده، با ستاره نشان داده شده است. سایر دایره‌ها، مکان‌های قبل و بعد از حصول شرایط تصویرسازی را نشان می‌دهد. MacKay and Abma (1992) روش تصویرسازی سطح تمرکز (focal-surface imaging) را به منظور برطرف کردن این مشکل معرفی کردند.

در این روش که از تکنیک آنالیز تمرکز عمقی استفاده می‌شود، شرایط تصویرسازی از یک نقطه در حوزه دورافت صفر، به یک سطح در حوزه دورافت مشترک تعمیم داده می‌شود. بدین ترتیب خطای تمرکز در حجمی از نقاط تمرکز در اطراف نقطه اصلی توزیع شده و آنالیز می‌شود. سپس به کمک آنالیز سرعت کوچ در حوزه عمق و پیش از برانبارش، محل واقعی کوچ تخمین زده شده و حجم حاوی نقاط خطای تمرکز کاهش داده می‌شود. این فرایند با به روز رسانی مدل سرعت، تکرار شده تا نقطه واقعی تمرکز که شرایط تصویرسازی در آن برقرار است، مشخص شود. MacKay and Abma (1992) نشان دادند که این روش، در مقابل خطاهای اندک سرعت و شرایط تصویرسازی، مقاوم است. در این روش، تغییرات جانبی سرعت توسط فاکتور میرا کننده کنترل می‌شود. با این حال، انتخاب فاکتور میرا کننده در شرایط تغییرات شدید جانبی سرعت، چندان کارایی نداشته، در عین حال که انتخاب آن در شرایط ساده نیز، توسط مفسر انجام گرفته و مقدار صحیح آن همواره مورد سؤال است. Gray (2004) نشان داد که در صورت استفاده از پرتوهای ضخیم در محل نقاط تصویرسازی، می‌توان شرایط تصویرسازی در حضور تغییرات جانبی سرعت را در محل واقعی، برقرار کرد. ایده بیان شده بر اساس بسط مفهوم اشعه‌های گاوسی (Gaussian Beam, GB) در رابطه با پرتوهای ضخیم و تصویرسازی اشعه گاوسی معرفی شده توسط Hill (2001) استوار گردید. با این حال برقراری شرط تصویرسازی در صورت استفاده از اشعه گاوسی، بسیار تحت تأثیر پیچیدگی ساختاری زمین‌شناسی و میزان تغییرات سرعت است.



(الف)

پهنای پنجره و سرعت میدان موج بستگی دارد. همچنین پهنای هر اشعه و انحنای جبهه موج در هر دسته اشعه، پارامترهایی است که در استفاده از اشعه گاوسی باید در نظر گرفته شوند (محمدی، ۱۳۹۳). Nowack (2003) به کمک مجموع اشعه‌های موازی محور گاوسی، انتشار میدان موج فرکانس بالا در محیط با ناهمگنی سرعت ولی تغییرات نرم را مدل کرد. Nowack (2003) بیان کرد که به دلیل عدم غیر یکتا بودن مؤلفه‌های اشعه گاوسی، می‌توان به جواب‌های یکسانی در تخمین پارامتر میدان موج حتی با پارامترهای متفاوت تصویرسازی اشعه گاوسی دست یافت. در ادامه، Popov et al., (2010) پیشنهاد می‌کنند که ابعاد عرض پرتو باید تا جای ممکن در تمام طول پرتو، حداقل باشد و مقدار سرعت نسبت به پهنای اشعه به شکل نرم تغییر کند.



شکل ۲: چگونگی استفاده از تعریف اشعه گاوسی به جای پرتو در انتشار میدان موج و انجام تصویرسازی به روش (Robein, GB (2010).

اشعه‌هایی که در این پنجره قرار می‌گیرند، به محیط تاو-پی تبدیل می‌شوند؛ بنابراین داده‌ها از حوزه نقطه میانی X_m ، به حوزه نقطه میانی-پارامتر پرتو p_m تبدیل می‌شوند (Gray, 2005). پس از انتقال داده‌های لرزه‌ای به محیط تاو-پی، هر المان از یک پنل اختیاری در محیط تاو-پی، جداگانه تصویرسازی خواهد شد. بدین منظور هر رخداد در این نمودار توسط زمان τ ، زمان-شیب یا پارامتر پرتو p ، محل گیرنده X_r ، مختصات چشمه X_s و مقدار دورافت معین، با شرط $t_s + t_r = \tau$ تصویرسازی می‌شود. دامنه نقطه تصویرسازی شده، میانگین وزن‌دهی شده از دامنه‌های لرزه‌ای در طول شیب P_j درون پنجره W است. Červený (2001) بیان کرد که با استفاده از اشعه گاوسی و تئوری‌های پرتو موازی محور، می‌توان به طور دقیق زمان سیر و دامنه جبهه موج در هر نقطه درون یک اشعه در اطراف پرتو مرکزی را تقریب زد. بدین ترتیب، محاسبه یک تک پرتو، همراه با پرتوهای

این تحقیق، چگونگی تأثیر مدل سرعت در شرایط تصویرسازی و کیفیت مقطع نهایی کوچ عمقی در ساختارهای نیمه پیچیده به روش تصویرسازی GB به همراه اضافه کردن شرایط تصویرسازی نرم (Guittou et al., 2007) به آن معرفی و بررسی می‌شود.

۳- روش تصویرسازی با اشعه گاوسی

روش اشعه گاوسی ابتدا توسط Hill (1990) بر اساس مبنای تئوری پرتوی ضخیم Červený et al. (1977) معرفی گردید. ایشان پیشنهاد دادند که می‌توان میدان موج تولید شده در چشمه را از پرتو به اشعه‌های گاوسی بسط داده و پارامترهای میدان موج را به صورت مجزا از چشمه تا نقاط پایانی محاسبه نمود. Hill (2001) روش GB را به عنوان یکی از روش‌های تعیین پارامترهای میدان موج با انتشار پیوسته جبهه موج معرفی کرد. در این روش از زمان و دامنه به شکل اعداد مختلط برای تصویرسازی استفاده می‌شود.

در تصویرسازی به روش اشعه گاوسی، بخش حقیقی این عدد، میزان انحنای موج منتشره در محیط را بیان می‌کند و بخش موهومی آن، چگونگی مستهلک شدن موج در محیط به شکل نمایی با دور شدن از پرتوی مرکزی را بیان می‌کند؛ بنابراین بخش حقیقی عدد مختلط زمان سیر، مانند روش‌های معمول برای تصویرسازی در طول پرتو استفاده می‌شود در حالی که بخش موهومی، به عنوان یک تابع کاهش‌دهنده دامنه عمل می‌کند؛ بنابراین کوچ اشعه گاوسی، به جای تعیین جدول زمان سیر با اعداد واقعی برای حرکت موج از چشمه به گیرنده، از جدولی با مقادیر بسیار زیاد و مختلط استفاده می‌کند (Hill, 2001). میدان موج لرزه‌ای در هر گیرنده توسط انتگرال‌گیری روی همه اشعه‌ها در مجاورت گیرنده ارزیابی می‌شود (Nowack et al., 2003). بنابراین اشعه گاوسی نه تنها اطلاعات به دست آمده توسط نزدیک‌ترین اشعه‌ها، بلکه اطلاعات اشعه‌های مجاور را هم در نظر می‌گیرد (Popov et al., 2010). در ادامه به منظور افزایش کیفیت تصویر نهایی Nowack (2011) در معرفی روش اشعه گاوسی، تنها بخش باریک و مستوی اشعه گاوسی در محل هدف را مورد استفاده قرار داد. اشعه‌ها همچنین دارای این مزیت هستند که به منظور توقف فرایند ردیابی پرتو، دیگر نیازی به برقراری شرط توقف به شکل رسیدن زمان پس انتشار به صفر نیست؛ بنابراین به منظور متوقف کردن ردیابی پرتو در هر موقعیتی می‌توان از شرایط دیگری استفاده کرد. روش اشعه گاوسی همچنین در ناحیه‌ای از میدان موج که تئوری پرتو با شکست مواجه شده است (همچون نقاط کائوستیک، ناحیه سایه و فواصل بحرانی) نتایج درستی به دست می‌دهد (Červený and Pšenčík, 2009). شکل ۲، نمای استفاده از اشعه گاوسی در انتشار میدان موج از سطح پایین را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، عرض دسته پرتوها (اشعه‌ها) در هر نقطه از محیط انتشار، به تعداد پرتوهای در نظر گرفته شده در

تعیین دقیق محل تصویرسازی در حضور مدل سرعت ثابت در فرایند تصویرسازی GB، می‌توان مقادیر دامنه میدان موج در محل مورد نظر را بر روی مکان هندسی نقاط تصویرسازی توزیع کرد. این فرایند در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، دامنه‌های مختلفی برای میدان موج در مکان هندسی دایره‌ای شکل توزیع شده است. پس از توزیع دامنه‌ها بر روی مکان هندسی مذکور، میدان‌های موج محاسبه شده تحت آزمون همدوسی قرار خواهد گرفت. نقطه‌ای که بیشترین مقدار همدوسی را به دست دهد، به عنوان محل اصلی تصویرسازی انتخاب خواهد شد. این فرایند به صورت نقطه به نقطه برای تمامی نمونه‌های دسته داده صورت خواهد گرفت.

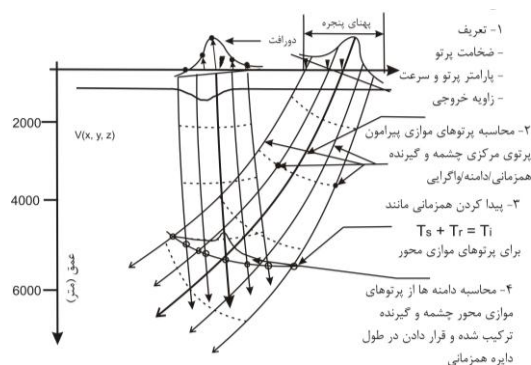
۵- تهیه عملگر GB با تغییر جانبی سرعت

Wang et al. (2008) در مدل‌سازی یک گنبد نمکی به روش GB، نشان دادند که استراتژی تصویرسازی نقطه به نقطه این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان تغییرات جانبی سرعت را در فرایند تصویرسازی وارد کرد. بدین منظور عملگر فرایند تصویرسازی که همان مکان هندسی مذکور است، در این تحقیق به گونه‌ای تغییر داده شد که تغییرات جانبی سرعت را تحمل کند. شکل ۶ مکان هندسی عملگر تغییر یافته در فرایند تصویرسازی GB در حضور تغییر جانبی مدل سرعت را نشان می‌دهد. مکان هندسی نشان داده شده، کمائی با شعاع‌های هم‌زمان، ولی نه الزاماً برابر در طول به دلیل سرعت متغیر را نشان می‌دهد. پس از انجام تصویرسازی با عملگر تغییر یافته بر روی تمامی نقاط واقع شده بر روی مکان هندسی، فرایند همدوسی می‌تواند نقطه مورد نظر برای تصویرسازی را به دست دهد. در این مرحله، الگوریتم نرم کردن Guitten et al. (2007) بر روی شرایط تصویرسازی اعمال شده و نقطه تصویرسازی با شرایط جدید انتخاب خواهد شد. بدین ترتیب تغییر جانبی سرعت در فرایند تصویرسازی به روش GB مدل می‌شود. این فرایند برای همه‌ی رویدادهای نشان داده شده در ستون P_j از پنل تاو- پی در شکل ۶ تکرار می‌شود. پهنای پنجره در تصویرسازی اشعه گاوسی بر نتایج تصویرسازی تأثیر خواهد داشت. عرض پنجره خیلی بزرگ، باعث می‌شود که اشعه‌های گاوسی تقریب قابل قبولی از دامنه میدان موج در نقطه تصویر به دست ندهد. در واقع جواب‌های قابل قبول در این روش تا آنجایی که دست خواهد آمد که میدان سرعت، تغییرات سریع جانبی درون پنجره از خود نشان ندهند (Gray and Bleistein, 2009). انتخاب مقدار عرض پنجره اندک باعث افزایش انحنای جبهه موج به طور اغراق‌آمیزی می‌شود. ضخامت اشعه‌ها را می‌توان به شکل تابعی از محتوای فرکانسی داده‌های لرزه‌ای بهینه‌سازی کرد. با انتخاب مناسب عرض پنجره، تعداد پنجره‌ها در هر چشمه و فاصله بین خط مرکزی از دو پنجره، می‌توان درصدی از همپوشانی را ایجاد کرد (Gray and Bleistein, 2009).

موازی محور مربوط به آن، دسترسی به اطلاعاتی در مورد انتشار در یک ناحیه خیلی بزرگ‌تر از زیر سطح را فراهم می‌کند. مراحل تصویرسازی یک نقطه منفرد در حوزه تاو- پی در شکل ۳ نشان داده شده است. چون پرتوهای موازی محور و اشعه‌های گاوسی اثر تغییر شکل دامنه را در طول چشمه مرکزی و پرتوهای گیرنده و درون اشعه حفظ می‌کند، دامنه‌ها در فرایند تصویرسازی اشعه گاوسی حفظ می‌شوند (محمدی، ۱۳۹۳).

۴- تأثیر مدل سرعت در تصویرسازی GB

در تصویرسازی به روش GB، به دلیل در نظر گرفتن فاصله‌هایی دورتر از پرتوی مرکزی تحت عنوان اشعه، می‌توان شرایط تصویرسازی را برای تعداد بیش از یک نقطه بررسی کرد (Tanushev et al., 2009). در ادامه، تصویرسازی برای تمامی نقطه‌های در نظر گرفته شده (همچنین نقطه‌های چشمه و گیرنده در حالت دورافت صفر) انجام خواهد گرفت.



شکل ۳: مراحل تصویرسازی به روش GB و برقراری شرط تصویرسازی در محل انجام تصویرسازی (Robein, 2010).

شکل ۴ نمونه‌ای از این فرایند را نشان می‌دهد. در این شکل اشعه‌های چشمه و اشعه‌های گیرنده در پهنای W انتخاب می‌شود. سپس نقاط متفاوتی در اطراف محل تقاطع اشعه‌های چشمه و گیرنده در نظر گرفته خواهد شد. این نقاط با دایره‌های نارنجی کوچک در شکل ۴ آورده شده است. محل واقعی که تصویرسازی بر روی آن باید صورت گیرد، در محل تقاطع دو پرتوی مرکزی اصلی است که با دایره پررنگ نشان داده شده. هریک از نقاط کوچک اطراف محل واقعی تصویرسازی، بیانگر محل‌هایی هستند که در صورت وجود تغییرات جانبی سرعت (با در نظر گرفتن ناهمسانگردی در مدل سرعت)، می‌توانستند به عنوان محل‌های تصویرسازی انتخاب گردند (Alkhalifah, 1995). نقطه معادل محل تصویرسازی در پنل تاو- پی با t_0 نشان داده شده. دامنه موج در محل واقعی تصویرسازی بر روی اشعه‌ها ترسیم شده. بیشترین دامنه در مرکز جبهه موج و محل تقاطع اشعه‌ها قرار دارد (Lu and Yang, 2011). به منظور

۷- ب، مدل سرعت نرم شده که برای تصویرسازی استفاده خواهد شد را نشان می‌دهد. به منظور تهیه رد لرزه‌های مصنوعی، با استفاده از روش ردیابی پرتو، ردهای نشان داده شده در شکل ۷-ج به دست آمده و در ادامه به نوفه آغشته گردید. جدول ۱ هندسه برداشت داده مصنوعی را نشان می‌دهد. در ابتدا روش بر روی داده مصنوعی بدون نوفه پیاده گردید و در گام بعد، داده به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۵ دسی بل آغشته گردید. شکل ۷-ه، مقطع به دست آمده با روش تصویرسازی GB بر روی داده بدون نوفه را نشان می‌دهد.

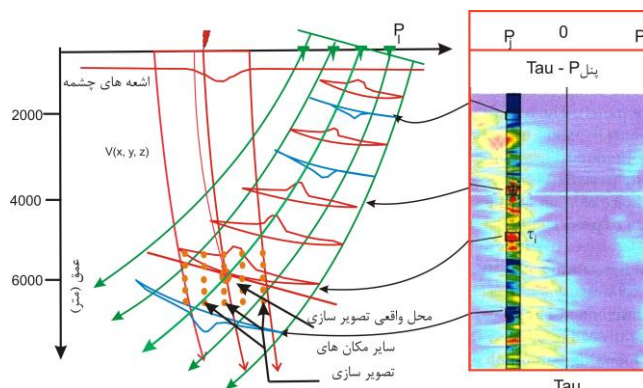
جدول ۱: پارامترهای هندسی مربوط به برداشت داده‌های مدل گنبدی شکل. در هر انفجار، اولین گیرنده بر نقطه انفجار منطبق است.

هندسه چشمه و گیرنده		هندسه نقطه میانی و دورافت	
تعداد چشمه‌ها	۷۵۰	تعداد شبکه CMP	۱۲۵۰
فاصله چشمه‌ها	۱۰ متر	حداکثر چینش CMP	۴۷
تعداد گیرنده‌ها	۳۰۰	فاصله بین CMP	۳۲ متر
فاصله گیرنده‌ها	۲۰ متر	بازه دورافت (متر)	۲۰۰۰ تا ۲۰
پارامترهای ثبت		محتوای فرکانس	
زمان ثبت	۳ ثانیه	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
فاصله نمونه‌برداری	۴ میلی‌ثانیه	حداکثر فرکانس	۴۰ هرتز

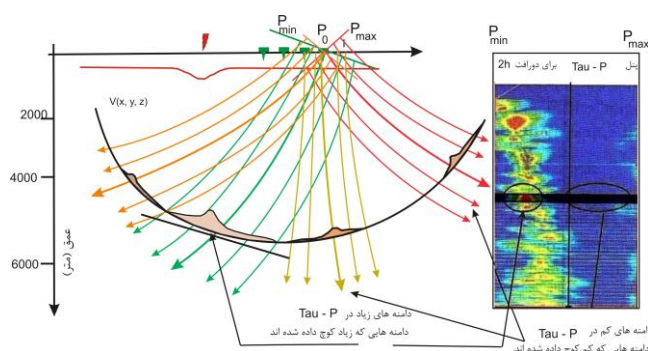
همان‌گونه که دیده می‌شود، روش تغییر یافته بر روی این داده به خوبی پیاده شده و مقطع نهایی، بازتابنده‌ها را به خوبی به تصویر درآورده است. شکل ۷- و نتیجه حاصل از اعمال تصویرسازی GB بر روی داده آغشته به نوفه را نشان می‌دهد. در این مرحله، روش به مانند قبل پیوستگی رخدادها را حفظ کرده و ساختار را به خوبی به تصویر درآورده است. با این حال سطحی از نوفه در مقطع نهایی باقی‌مانده است. شکل ۷- ز مقطع به دست آمده از داده مصنوعی بدون نوفه به روش کیرشلف، جهت مقایسه را نشان می‌دهد و همچنین مقطع همدوسی به دست آمده از تصویرسازی داده آغشته به نوفه در شکل ۷- ی آورده شده است. میزان همدوسی بالای به دست آمده به ویژه در امتداد بازتابنده‌ها، بیانگر قابل قبول بودن فرایند تصویرسازی بر روی این بازتابنده است. این مقطع همچنین در محل تداخل شیب‌ها، همدوسی بالایی را نشان می‌دهد. این مسئله بدان معنی است که شرایط تصویرسازی در این نقاط برقرار بوده و عملگر، آن رخدادی را به تصویر درمی‌آورد که میزان همدوسی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. این مسئله بیان می‌کند؛ که می‌توان این روش را به شکل دسته روش‌های وزن دار تغییر داد که در این تحقیق مد نظر نیست.

۷- اعمال تصویرسازی بر روی داده واقعی

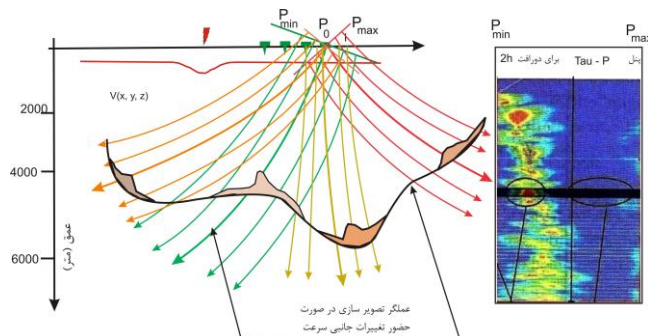
به منظور بررسی چگونگی اعمال کردن تغییرات جانبی سرعت در روش تصویرسازی GB، داده لرزه‌ای مربوط به یک ساختار



شکل ۴: تصویرسازی اشعه گاوسی از یک ستون P_z حوزه برداشت انفجاری تاو-پی (Robein, 2010).



شکل ۵: تصویرسازی به روش اشعه گاوسی در یک پنل تاو-پی و بررسی برقراری شرایط تصویرسازی در یک نقطه (Robein, 2010).



شکل ۶: چگونگی بررسی برقراری شرط تصویرسازی در یک نقطه مشابه با شکل ۵، ولی در حضور تغییرات جانبی سرعت (با اعمال تغییرات از Robein, 2010).

۶- اعمال تصویرسازی GB بر داده مصنوعی

به منظور بررسی روش پیشنهادی، مدل مصنوعی با ساختاری نیمه پیچیده تهیه شد. سپس به کمک تکنیک ردیابی پرتو، داده لرزه‌ای مصنوعی از مدل تهیه شده، به دست آمد. شکل ۷- الف، مدل بلوکی سرعت ساخته شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این مدل، سرعت در هر لایه ثابت بوده ولی به دلیل پیچیده بودن ساختار، ناهمگنی جانبی سرعت در هر افق ایجاد می‌شود. شکل

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

نمی‌رسد. علاوه رابطه (۳)، توابع سرعت استاندارد توسط افراد مختلف ارائه شده که می‌توان از آن‌ها برای توصیف نحوه تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق استفاده کرد. از بین این مدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (وحید هاشمی و سلیمانی، ۱۳۹۳):

$$V_{inst}(z) = v_0(1 + a \cdot z)^b \quad \text{تابع چند جمله‌ای} \quad (۴)$$

$$V_{inst}(z) = v_0 e^{k \cdot z} \quad \text{تابع کیارلی-سرا} \quad (۵)$$

$$V_{inst}(z) = a \cdot z^b, b = 1.6 \quad \text{قانون فاست} \quad (۶)$$

که در این توابع، V_{inst} ، سرعت لحظه‌ای در هر نقطه از مدل را نشان می‌دهد. V_0 سرعت اولیه، k نرخ افزایش سرعت با عمق Z و a و b ثوابتی هستند که می‌تواند توسط داده‌های چاه، اطلاعات جانبی، روش اسکن مدل سرعت و یا به شکل سعی و خطا با کنترل تصحیحات کوچ به دست آید. در ادامه با کمک نشانگرهای جنبشی میدان موج که در روش سطح بازتاب مشترک به دست می‌آیند، مدل سرعت‌های نشان داده شده در شکل‌های ۸ تا ۱۰ به ترتیب با استفاده از توابع چند جمله‌ای، کیارلی-سرا و قانون فاست تهیه شده‌اند.

استفاده از یک مدل سرعت نهایی باید مستدل بر داده‌های چاه در گام اول و یا داده‌های پروفیل لرزه‌ای قائم (VSP) باشد. در واقع بدون داشتن این اطلاعات، نمی‌توان در رابطه با مدل نهایی سرعت که می‌تواند برای بخش تفسیر استفاده شود، نظر نهایی را بیان داشت. با این وجود در منطقه مورد مطالعه، داده‌های چاه و یا VSP وجود نداشته، چراکه منطقه تحت عملیات اکتشافات اولیه بوده و هدف در این مرحله تنها پیدا کردن ساختار بوده است. بر همین اساس می‌توان بررسی کرد که در بین توابع سرعتی موجود و در یک روش کوچ مقاوم، کدام مدل سرعت می‌تواند به عنوان یک مدل سرعت مناسب برای کوچ، (حداقل در این مرحله) انتخاب گردد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، رابطه ساده چند جمله‌ای قادر به وارد کردن تغییرات جانبی سرعت در مدل نیست. لذا انتظار نمی‌رود که با استفاده از این مدل، جزئیات بیشتری از تصویر لرزه‌ای نهایی حاصل شود. شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، مقاطع حاصل از تصویرسازی لرزه‌ای با مدل‌های سرعت به دست آمده در مرحله قبل را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ مقطع لرزه‌ای حاصل از تصویرسازی GB با استفاده از مدل سرعت چند جمله‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، جزئیات کمتری از بازتابنده‌ها حاصل شده. بازتاب گسل مشخص شده در این مقطع، با طول بیشتر از واقعی تصویر شده. رخدادهای پرسیب با پیوستگی کمتری به نمایش درآمده‌اند و ساختار فروافتاده کوچک در بالای گنبد نمکی نیز با وضوح کمتری قابل تفسیر است. با این وجود، مدل سرعت به دست آمده با روش چندجمله‌ای، دارای قابلیت بهتری در کمک به تصویرسازی بازتابنده‌های افقی و یا بازتابنده‌های منحنی با شعاع انحنای بالا است.

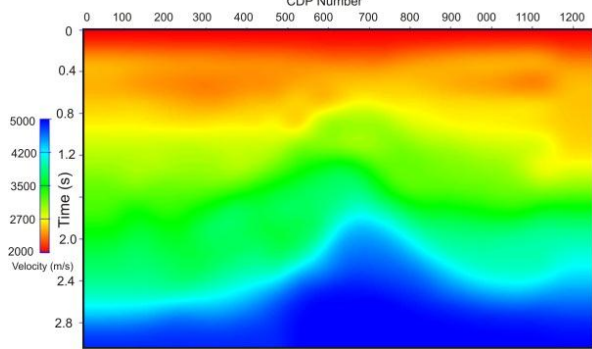
زمین‌شناسی پیچیده انتخاب گردید. به منظور تهیه تصویر دقیقی از ساختارهای زیرسطحی، داده‌ها با هندسه بسیار متراکم برداشت گردیده. جدول ۲ هندسه برداشت داده‌ها در منطقه انتخابی را نشان می‌دهد. در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده، معمولاً لایه‌ها و ساختارها دارای تغییرات جانبی در سرعت لرزه‌ای هستند. زمین‌شناسی منطقه در داده‌های انتخاب شده دارای لایه‌های پرسیب در دو سوی یک گنبد نمکی بزرگ و با هندسه پیچیده است. در بالای گنبد نمکی، لایه‌ها به صورت گنبدی درآمده، گسل خورده و در بالای گنبد نمکی، یک فروافتادگی کوچک با بازتابنده‌های با فاصله کم پر شده (که احتمالاً می‌تواند برشی از یک کانال پر شده باشد)، به چشم می‌خورد. به منظور تهیه مدل سرعت با تغییرات جانبی در تصویرسازی به روش GB، از روش توموگرافی موج عمود در نقطه ورود با توابع سرعت مختلف استفاده گردید. در واقع تئوری موج عمود در نقطه ورود بیان می‌دارد که اطلاعات زمان سیر مرتبه دوم برای تهیه یک مدل سرعت به منظور تصویرسازی عمقی در محیط‌های با ناهمگنی جانبی، کفایت می‌کند (Duveneck, 2004).

استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان سیر به منظور توصیف رخدادهای بازتابی در داده لرزه‌ای، به طور چشم‌گیری موجب ساده‌تر شدن فرایند استخراج نشانگرهای جنبشی میدان موج از داده‌ی پیش از برانبارش می‌شود. این نشانگرها برای تمام نمونه‌های دورافت صفر، صرف‌نظر از اینکه متعلق به یک رخداد واقعی باشد یا خیر، تعیین می‌شوند. در ادامه، نقاط مورد نیاز برای روش توموگرافی موج عمود در نقطه ورود از مقاطع حاصل از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک به صورت خودکار استخراج می‌شوند. خودکار بودن فرایند استخراج نقاط یا دست‌چین کردن آن‌ها، از بزرگ‌ترین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های توموگرافی است. همچنین لازم به ذکر است که در فرایند دست‌چین کردن الزامی به قرارگیری نقاط دست‌چین شده بر روی یک رخداد بازتابی پیوسته نیست.

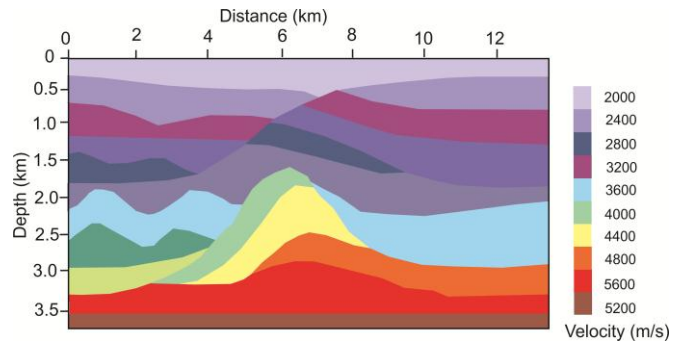
در اولین گام در تهیه مدل سرعت، یک مدل اولیه انتخاب خواهد شد. مدل اولیه مطلوب، مدلی است که بتواند تغییرات کلی سرعت را چه در جهت قائم و چه در جهت افقی نشان دهد. ساده‌ترین راه تهیه مدل اولیه، استفاده از رابطه‌ی خطی تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق است (Jones, 2014):

$$V_{inst} = v_0 + k \cdot z \quad (۳)$$

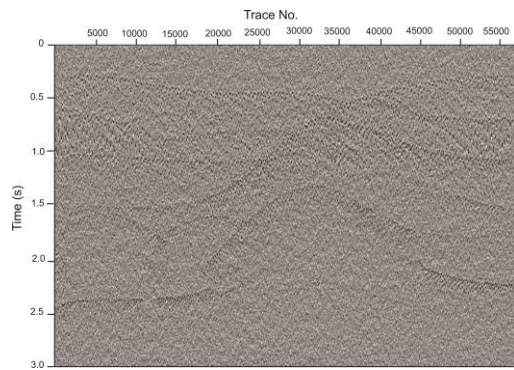
این رابطه، نحوه افزایش سرعت با عمق را با استفاده از دو پارامتر نشان می‌دهد که در آن v_0 سرعت اولیه انتشار موج در نزدیک سطح زمین و k گرادیان تراکم است که به صورت ضریب، نرخ افزایش سرعت با عمق، Z را تعیین می‌کند. رابطه (۱) افزایش سرعت در مدل را به صورت خطی بررسی کرده و به منظور تهیه مدل سرعت در مناطق با ساختارهای پیچیده، چندان مناسب به نظر



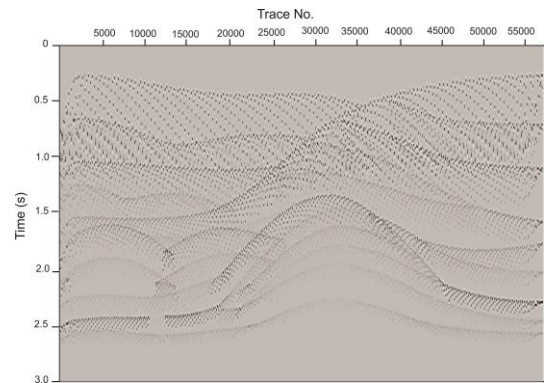
(ب)



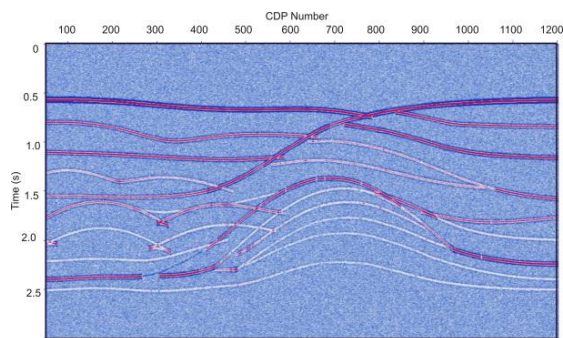
(الف)



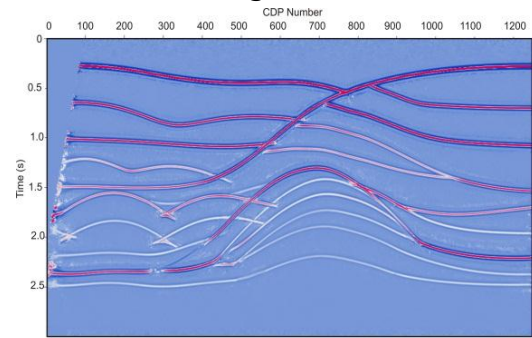
(د)



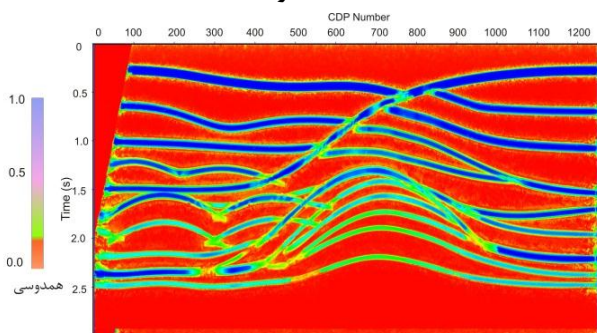
(ج)



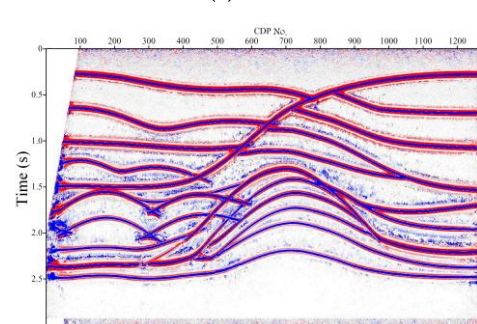
(و)



(ه)

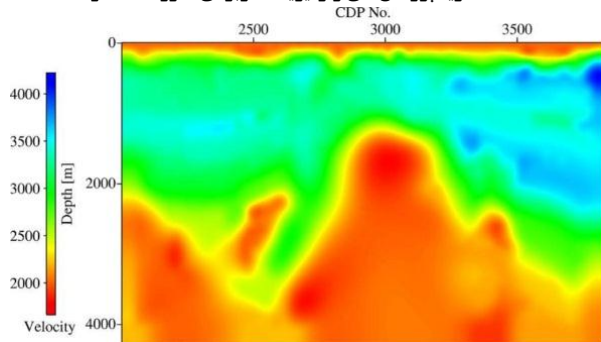


(ی)

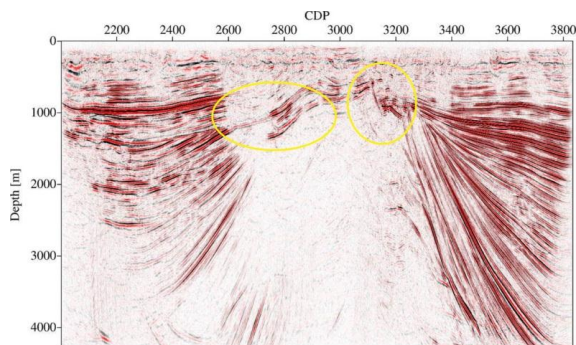


(ز)

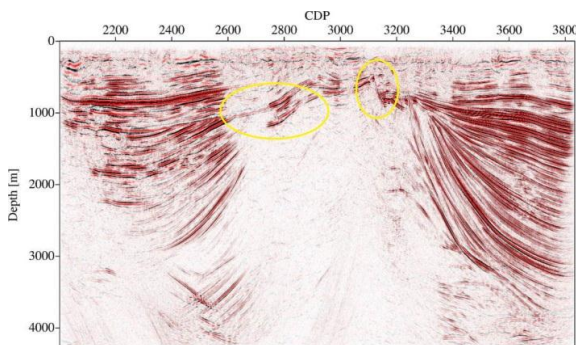
شکل ۷: الف) مدل بلوکی سرعت که داده‌های لرزه‌ای از آن به دست آمده است. ب) مدل نرم شده سرعت مورد استفاده در تصویرسازی، ج) داده برداشت شده شامل نزدیک به ۶۰ هزار رد لرزه، د) داده لرزه‌ای آغشته به نوفه، ه) نتیجه تصویرسازی بر روی داده مصنوعی بدون نوفه. و) نتیجه تصویرسازی بر روی داده مصنوعی آغشته به نوفه، ز) تصویرسازی به روش کیرشلف. ی) مقطع همدوسی تصویرسازی بر روی داده آغشته به نوفه.



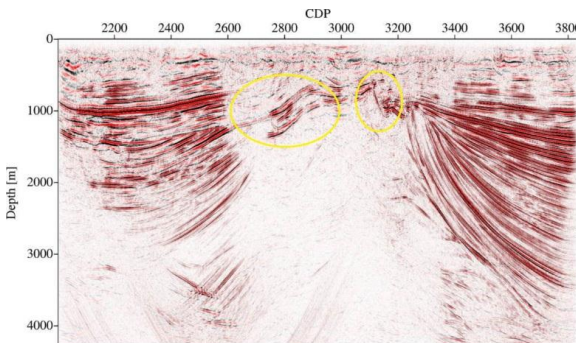
شکل ۱۰: مدل سرعت روش فاست است (متر بر ثانیه).



شکل ۱۱: مقطع لرزه‌ای نتیجه انجام کوچ اشعه گاوسی با استفاده از مدل سرعت تابع چند جمله‌ای.



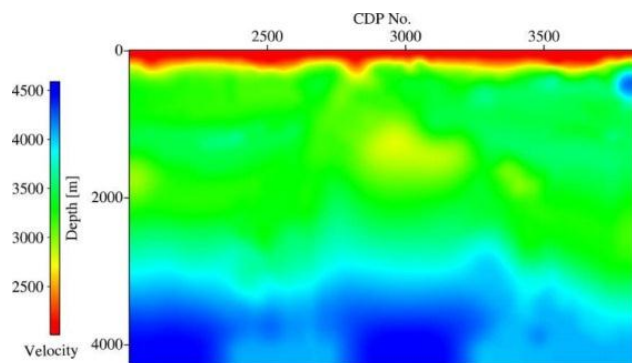
شکل ۱۲: مقطع لرزه‌ای نتیجه انجام کوچ اشعه گاوسی با استفاده از مدل سرعت کیارلی - سرا.



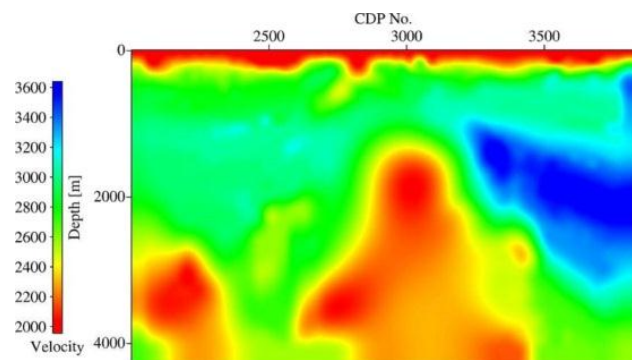
شکل ۱۳: مقطع لرزه‌ای نتیجه انجام کوچ اشعه گاوسی با استفاده از مدل سرعت فاست.

جدول ۲: پارامترهای هندسی برداشت داده، مربوط به داده واقعی.

هندسه چشمه و گیرنده	
تعداد چشمه‌ها	۹۱۶
فاصله چشمه‌ها	۲۰ متر
تعداد گیرنده‌ها	۳۶۲
فاصله گیرنده‌ها	۲۰ متر
پارامترهای ثبت	
زمان ثبت	۶ ثانیه
فاصله نمونه‌برداری	۲ میلی ثانیه
هندسه نقطه میانی و دورافت	
تعداد شبکه CMP	۱۸۳۲
حداکثر تعداد چینش CMP	۱۸۱
فاصله بین شبکه CMP	۱۰ متر
بازه دورافت	۱۵۰-۴۰۰۰
محتوای فرکانس	
فرکانس سوپ	۸ تا ۹۰ هرتز
فرکانس غالب	۲۰ هرتز



شکل ۸: مدل سرعت تابع چند جمله‌ای (متر بر ثانیه).



شکل ۹: مدل سرعت تابع کیارلی - سرا (متر بر ثانیه).

۸- نتیجه گیری

برطرف کردن مشکلات کوچ در روش‌های معمول، زمینه معرفی روش‌های تصویرسازی لرزه‌ای را فراهم نمود. روش‌های تصویرسازی لرزه‌ای بسیاری از مشکلات روش‌های مرسوم کوچ از جمله به تصویر در آوردن رخدادهای پرشیب، تصویرسازی زیر گنبد نمکی، تصویرسازی ساختارهای چین‌خورده و تهیه تصویر دقیق گسل‌ها در بازتابنده‌ها را برطرف نمود. با این حال مسئله تغییرات شدید جانبی سرعت و تأثیر مخرب آن در تصویرسازی لرزه‌ای، در برخی از روش‌های تصویرسازی همچنان وجود داشت. راهکارهای مختلفی به منظور برطرف کردن این مشکل و یا کاهش اثرات آن بر روی تصویر نهایی معرفی گردید که هر یک استراتژی‌های متفاوتی را استفاده می‌کردند. اضافه کردن پارامتر میرا کننده، نرم کردن شرایط تصویرسازی و انجام محاسبات در حوزه فرکانس از جمله این استراتژی‌هاست. روش تصویرسازی اشعه گاوسی، از انواع دسته روش‌هایی است که بر شرایط تصویرسازی در حضور تغییرات جانبی سرعت و کاهش خطای تصویرسازی تمرکز دارد. در این روش، شکل عملگر تصویرسازی بر اساس تغییر سرعت موج در محیط انتشار تعیین می‌شود. بدین ترتیب می‌توان تصویر دقیق‌تر از ساختارهای پیچیده تهیه کرد. در روش تصویرسازی اشعه گاوسی، محدودیت شیب و حساسیتی به مدل سرعت وجود ندارد. این روش همچنین در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد قابلیت کاربرد دارد. این روش همچنین از نظر زمان پردازش، بسیار کوتاه‌تر از بسیاری از روش‌های تصویرسازی دیگر است. با این حال میزان تغییرات جانبی سرعت و شدت پیچیدگی ساختاری که تأثیرات مخربی بر تصویرسازی به روش GB نداشته باشد، همواره مورد سؤال بوده است. نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ میزان این اثر در یک ساختار پیچیده با مدل‌های سرعت متفاوت را بیان می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود، در گام اول تغییرات جانبی در مدل سرعت لحاظ شده است. در گام بعد، مسئله اصلی، توانایی تکنیک تصویرسازی انتخاب شده در استفاده از مدل سرعت تهیه شده است. روش تصویرسازی اشعه گاوسی با بررسی شرایط تصویرسازی در تعداد زیادی از نقاط اطراف نقطه اصلی، توانایی استفاده از این مدل سرعت را دارا می‌باشد. در شکل ۱۳، محل گسل، ساختار فروافتاده کوچک پر شده، قطع شدگی رخداده‌ها در برخورد با گنبد نمکی و ناپیوستگی در مقطع به خوبی نشان داده شده است. البته باید دقت شود که با توجه به تأثیر عرض پرتو در کیفیت تصویر نهایی، از معیارهای مختلفی جهت تعیین عرض پرتو استفاده کرد که در این تحقیق از رابطه مرسوم مورد استفاده در روش اشعه گاوسی استفاده گردید. همچنین گمان می‌رود که با استفاده از تکنیک کوچ معکوس (Demigration) می‌توان نقاطی که شرایط تصویرسازی در آن‌ها برقرار است را با دقت بیشتری تشخیص داد. بدین ترتیب که با دانستن میزان مهاجرت توسط

شکل ۱۲، مقطع لرزه‌ای به دست آمده از تصویرسازی GB با کمک مدل سرعت کیارلی- سرا را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در مدل سرعت مربوط به این روش نیز ملاحظه گردید (شکل ۹)، تابع کیارلی- سرا قادر به وارد کردن تغییرات شدید سرعت، چه در جهت جانبی و چه در جهت قائم، در مدل سرعت است. از نظر ظاهری، مدل سرعت شکل ۹ نیز دارای همخوانی بیشتری با هندسه مقطع لرزه‌ای شکل ۱۲ است. گسل واقع شده در بالای گنبد نمکی، در این مقطع کاملاً در محل واقعی خود قرار گرفته (بدون امتداد اضافی در بازتابنده‌های بالا و پایین گسل) و لایه‌های پرشیب با امتداد بیشتری به تصویر درآمده‌اند. با این حال، همانند مقطع شکل ۱۱، ساختار فروافتاده کوچک در بالای گنبد نمکی در این شکل نیز به خوبی تصویرسازی نشده است.

شکل ۱۳، مقطع لرزه‌ای به دست آمده از تصویرسازی GB با کمک تابع سرعت فاست را نشان می‌دهد. این تابع نیز توانسته تغییرات جانبی و کامل سرعت را وارد مدل کند. در تصویر لرزه‌ای به دست آمده با استفاده از مدل سرعت فاست، گسل مورد بحث به صورت کامل به تصویر درآمده، لایه‌های پرشیب دارای امتداد بیشتری هستند، محل قطع‌شدگی بازتابنده‌ها واضح‌تر بوده و ساختار فروافتاده کوچک در بالای مقطع با وضوح بیشتری به تصویر درآمده است. در روش‌های تصویرسازی لرزه‌ای و به ویژه در تصویرسازی عمقی، دارا بودن اطلاعات عمقی و ساختاری از چاه به عنوان تنها روش اعتبار سنجی خارجی و قطعی شناخته می‌شود. در این مطالعه به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات چاه، اعتبار سنجی نتایج با تفسیرهای زمین‌شناسی، تفسیرهای آنالیز کوچ و مقایسه با سایر روش‌ها انجام گرفت.

به مانند روش کوچ کیرشهف، این روش نیز در مکان‌هایی که عملگر تصویرسازی کامل نیست، جواب کاملاً دقیقی به دست نخواهد داد. در واقع در زمان‌های کم، به دلیل آنکه تعداد نقاطی که شرایط تصویرسازی در آن‌ها بررسی می‌شود، اندک است (با توجه به شکل ۴)، لذا شرایط تصویرسازی صد در صد برقرار نیست. از این رو تصویر کوچ نهایی نیز ممکن است اندکی دارای خطا باشد. این مسئله در داده واقعی تا حدی مشاهده می‌شود. از این رو، شاید بتوان استراتژی نرم کردن شرایط تصویرسازی در کوچ اشعه گاوسی را تا حدی به دسته روش‌های کوچ محدود به هدف (target oriented migration) متعلق دانست که در آن‌ها پارامترهای تصویرسازی تنها بر اساس محل قرارگیری هدف تعیین می‌شود و عملگر کوچ یا تصویرسازی، بهترین عملکرد خود را در محدوده هدف و اطراف آن خواهد داشت و در سایر قسمت‌ها احتمالاً از دقت و صحت کمتری برخوردار خواهد بود.

- Hill, N.R., 1990, Gaussian beam migration, *Geophysics*, 55 (11), 1416-1428. DOI: 10.1190/1.1442788.
- Hill, N.R., 2001, Prestack gaussian-beam depth migration. *Geophysics*, 66 (4), 1240-1250. DOI: 10.1190/1.1487071.
- Jones, I.F., 2014, Migration imaging conditions, *First break*, 32, 45-55.
- Lu, J. and Yang, X., 2011, Frozen Gaussian approximation for high frequency wave propagation, *Communication of Mathematical Science*, 9, 663-683.
- Luo, S., 2014, Improved methods of reflection seismic data processing for velocity estimation, imaging, and interpretation. Ph.D. Thesis, Dolorado School of Mine, Center for Wave Phenomena, Colorado.
- MacKay, S. and Abma, R., 1992, Imaging and velocity estimation with depth focusing analysis, *Geophysics*, 57 (2), 1608-1622, DOI: 10.1190/1.1443228
- Ng, M., 2007, Using time-shift imaging condition for seismic migration interpolation, Presented at the 77th Annual International SEG Meeting.
- Nita, B.G., 2006, A comparison of the imaging conditions and principles in depth migration algorithms, *International journal of tomography and statistics*, 4 (6), 5-16.
- Nowack, R., Sen, M. and Stoffa, P., 2003, Gaussian beam migration for sparse common-shot and common-receiver data. 73rd Annual International SEG Meeting, 1114-1117.
- Nowack, R., 2011, Dynamically focused Gaussian Beams for seismic imaging, *International Journal of Geophysics*, ID 316581, DOI: 10.1155/2011/316581.
- Pon, S. and Lines, L.R., 2004, Sensitivity analysis of seismic depth migrations, *Canadian structural model*, CSEG Annual Meeting.
- Popov, M.M., Semtchenok, N.M., Popov, P.M. and Verdel, A.R., 2010, Depth migration by the Gaussian beam summation method, *Geophysics*, 75 (2), S81-S93, DOI: 10.1190/1.3361651.
- Protasov, M.I. and Tcheverda, V.A., 2011, Fracture detection by Gaussian beam imaging of seismic data and image spectrum analysis, *Geophysical Prospecting*, 61 (1), 68-82, DOI: 10.1111/1365-2478.12259.
- Robein, E., 2010, Seismic imaging a review of the techniques their principles, merits and limitation: EAGE Publication.
- Shabelansky, A.H., 2015, Theory and application of source independent full wavefield elastic converted

عملگر، می‌توان میزان تغییرات مقطع کوچ معکوس یافته و مقطع قبل از کوچ را بررسی کرد. سپس نقاطی که عملگر تصویرسازی در آن‌ها نادرست عمل کرده، شناسایی شده و در مرحله دوم کوچ، حذف می‌شوند. در نهایت می‌توان بیان کرد که استراتژی نرم کردن شرایط تصویرسازی (که با نرم کردن مدل سرعت با تغییرات جانبی به دست آمده) در روش تصویرسازی اشعه گاوسی قابلیت تصویرسازی در ساختارهای پیچیده را افزایش داده است.

۹- منابع

- محمدی، س.، ۱۳۹۳، کوچ اشعه گاوسی با استفاده از روش دنبال کردن پرتوی مختلط در حوزه عمق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ژئوفیزیک، لرزه‌شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- وحید هاشمی، م. و سلیمانی، م.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی ناهمگنی جانبی سرعت در توموگرافی لرزه‌ای با تعریف تابع‌های سرعت اولیه متفاوت. *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۸ (۴)، ۱۳۲-۱۶۷.
- Alkhalifah, T., 1995, Gaussian beam depth migration for anisotropic media, *Geophysics*, 60 (5), 1474-1484., DOI: 10.1190/1.1443881.
- Červený, V., Molotkov, I.A. and Pšenčík, I., 1977, Ray method in seismology, Charles University, Prague.
- Červený, V., 2001, Seismic Ray Theory, Cambridge University Press, Cambridge.
- Červený, V. and Pšenčík, I., 2009, Gaussian beams in inhomogeneous anisotropic layered structures, Report 19, Department of Geophysics, Charles University, Praha, 123-156.
- Duveneck, E., 2004, Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes, Diploma thesis, Karlsruhe Insitute of Technology (KIT).
- Fomel, S., 2007, Velocity-independent time-domain seismic imaging using local event slopes. *Geophysics*, 72 (3), S139-S147, DOI: 10.1190/1.2714047.
- Gray, S.H., 2004, Nuts and bolts of beam migration, Presented at the annual CSEG meeting.
- Gray, S.H., 2005, Gaussian beam migration of common shot records, *Geophysics*, 70, S71-S77, DOI: 10.1190/1.1988186.
- Gray, S.H. and Bleistein, N., 2009, True-amplitude Gaussian-beam migration. *Geophysics*, 74 (2), S11-S23, DOI: 10.1190/1.3052116.
- Guittou, A., Valenciano, A., Bevc, D. and Claerbout, J., 2007, Smoothing imaging condition for shot-profile migration, *Geophysics*, 72 (3), S149-S154, DOI: 10.1190/1.2712113.

wave fields, Journal of computational physics, 228, 8856-8871.

phase seismic imaging and velocity analysis, Ph.D Thesis, MIT.

Wang, B., Ji, J., Mason, C., Gajawada, S. and Kim, Y., 2008, Beam-based interactive imaging for salt interpretation and salt model building, Presented at 78th Annual International SEG Meeting, 3073-3077.

Sava, P. and Fomel, S., 2006, Time-shift imaging condition in seismic migration: Geophysics, 71 (6), S209-S217, DOI: 10.1190/1.2338824.

Tanushev, N.M., Engquist, B. and Tsai, R., 2009, Gaussian beam decomposition of high frequency



Smoothing Imaging Condition and Handling Lateral Velocity Change in Gaussian Beam Seismic Imaging

Mehrdad Soleimani^{1*} and Somayeh Mohammadi²

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

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

Received: 29 December 2015; Accepted: 7 February 2016

Corresponding author: mssoleimani@shahroodut.ac.ir

Keywords

Gaussian Beam Migration
Ray Theory
Seismic Imaging
Lateral Velocity Change

Extended Abstract

Summary

An approximation of the reflection coefficient in seismic imaging condition is described by dividing the upgoing wavefield to the downgoing wavefield in the image point. Calculation of the reflection coefficient would be unstable wherever downgoing wave field equals or is close to zero. The imaging conditions will be distorted in the presence of the lateral velocity change. In this study, we have used the strategy of smoothed imaging condition in the Gaussian beam (GB) imaging method. The new operator has been changed in order to handle lateral velocity change. Different imaging points, distributed on a non-circular imaging operator, have been analyzed by coherency analysis. The point that gives the highest coherency would be selected as the final imaging point. The new strategy has been applied on synthetic and real land seismic data. Results of the synthetic data have been promising in the final image. The real data have been processed by three different velocity models. These velocity models have been obtained by different velocity functions to model velocity changes in different levels. The final image has proved that smoothing imaging condition can handle the lateral velocity change in the propagation media.

Introduction

Different methods and strategies have been introduced to handle the problem of imaging condition. In one study, the focal surface imaging method has been introduced for imaging in complex media. The imaging condition is evaluated in common offset domain rather than the zero offset domain. By this strategy, the imaging condition would be evaluated in a surface of points instead of a single one. Thus, the errors in these conditions will be distributed in different points and the final imaging point is selected by coherency analysis. In other study, thick rays have been used to reduce errors in imaging condition. The concept of thick rays has also been used to introduce the GB migration method. To better resolve the problem, imaging condition smoothing in wavefield propagation has been used to handle the lateral velocity change. In this study, the smoothing strategy is used in the GB imaging method.

Methodology and Approaches

The GB imaging operator is an isochrone that is produced by a set of beams which will be propagated forward for shot wavefield and backward for receiver wavefield. The imaging is located on the isochrones, exactly in the cross point of the shot wavefield and receiver wavefield central beams. By smoothing the imaging condition, the imaging operator is not an exact semicircle, but could have any shape. This isochrone is created by beams propagated in the media with lateral velocity change. Then, different points are selected as the image point on this operator. By a simple coherency analysis, the point that gives the highest coherency would be selected as the final image point.

Results and Conclusions

The smoothing strategy has been applied on synthetic and real land seismic data set. The synthetic data have been created by ray tracing technique on a velocity model having constant velocities on layers. However, complex structure of the model will produce the desired lateral velocity change in the media for wavefield propagation. The results of applying the strategy on free noise data and data contaminated with noise have been promising. To better understand the effect of the lateral velocity change in the media, the real land data set has been imaged by three different velocity models. These velocity models present three different degrees of velocity change, small, mild and high. Imaging with velocity model having small velocity change has been unable to accurately focus the reflectors. The velocity model with high lateral velocity change has also been unable to image minor truncations in the reflectors. It is may be due to the

JRAG, 2015, Vol 1, No 1.

simple coherency analysis used. The final image obtained by the velocity model with mild lateral velocity change, however, has been promising as it contains better image of the faults, reflector truncations and more preserving of the continuity in the reflectors.
