

ارائه شرط تصویرسازی بر مبنای بردارهای پوئین تینگ در روش

لرزه‌های مهاجرت زمانی معکوس

فرزاد مرادپوری^۱؛ علی مرادزاده^{۲*}؛ مهرداد سلیمانی منفرد^۳؛ ری نام کروزی پستانا^۴

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود f.moradpouri@gmail.com

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران a_moradzadeh@ut.ac.ir

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

۴- استاد دانشکده فیزیک، گروه ژئوفیزیک و زمین‌شناسی، دانشگاه فدرال باهیا، برزیل

(دریافت ۳۰ دی ۱۳۹۴، پذیرش ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

چکیده

نوفه‌های فرکانس پایین از جمله شاخصه‌های روش مهاجرت زمانی معکوس^۱ (RTM) می‌باشند. در این مطالعه، ابتدا از فیلتر بالاگذر، فیلتر لاپلاسی و یک شرط تصویرسازی بر مبنای مؤلفه‌های پایین‌رونده برای تعدیل این نوفه‌ها استفاده می‌شود. سپس شرط تصویرسازی جدیدی ارائه می‌شود که اساس روش مهاجرت زمانی معکوس ارائه شده برای حذف این دسته نوفه‌های فرکانس پایین است. در شرط تصویرسازی بیان شده، میدان‌های موج بر اساس اطلاعات حاصل از بردارهای پوئین تینگ به مؤلفه‌های پایین‌رونده و بالارونده جداسازی شده، همچنین بر اساس اطلاعات بردارهای پوئین تینگ زوایای بازتاب محاسبه و تابعی وزن‌دار معرفی می‌شود. نتیجه حاصل از بکارگیری روش بهبود یافته RTM روی داده‌های یک مدل مصنوعی استاندارد برگرفته از یک محیط پیچیده زمین‌شناسی (مدل مارموزی)، نشان‌دهنده کارآمدی روش پیشنهادی برای حذف نوفه‌های تولیدی با فرکانس پایین در تولید تصویر عمقی مهاجرت یافته با کیفیت و وضوح بالا است. همچنین روش بیان شده، کلیه ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی را به صورت مناسب تصویر می‌نماید.

کلمات کلیدی

تصویرسازی لرزه‌ای، مهاجرت زمانی معکوس، شرط تصویرسازی، نوفه‌های فرکانس پایین، بردار پوئین تینگ

۱- مقدمه

از جمله روش‌های عمده تصویرسازی لرزه‌ای می‌توان به روش‌های تصویرسازی پرتو-مبنا (همانند روش‌های کیرششف و گوسین-بیم) و روش‌های تصویرسازی معادله موج-مبنا همانند حل یک طرفه معادله موج و حل دو طرفه معادله موج که به اصطلاح مهاجرت زمانی معکوس نامیده می‌شود اشاره کرد. از جمله معایب روش‌های پرتو-مبنا و حل یک طرفه معادله موج، می‌توان به عدم موفقیت آن‌ها در تصویر کردن ساختارهای پرشیب همانند یال‌های گنبد نمکی و یا چین‌خوردگی‌های رورانده در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده اشاره کرد، در حالی که در روش RTM این مشکل برطرف می‌شود [۱].

همون (۱۹۷۸) اولین محققی است که به مهاجرت زمانی معکوس اشاره کرده است [۲]. ویت‌مور (۱۹۸۳)، مک‌مچان (۱۹۸۳) و بایسال و همکاران (۱۹۸۳)، اولین کسانی بودند که در این زمینه مقالاتی با عناوین مختلف ارائه کردند [۳-۵]. استفاده از این روش با پیشرفت سیستم‌های محاسباتی و افزایش چالش‌های موجود در تصویرسازی ساختارهای با زمین‌شناسی پیچیده به سال‌های اخیر بر می‌شود. برتری روش RTM نسبت به سایر الگوریتم‌های تصویرسازی به استفاده این روش از معادله کامل موج صوتی در جهت برونابی میدان موج بر می‌شود. زیرا این معادله، انتشار موج در همه جهات را شبیه‌سازی می‌کند، در نتیجه محدودیت‌های زاویه‌ای را برطرف کرده و حتی امواج منشوری و وارون شده را نیز تصویر می‌کند. انتشار میدان‌های موج چشمه و گیرنده با استفاده از معادله موج صوتی کامل به صورت معادله ۱، توصیف می‌شود [۱].

$$\frac{1}{v^2(\mathbf{x})} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(\mathbf{x}, t) = \nabla^2 p(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

به طوری که $p(\mathbf{x}, t)$ فشار میدان موج در محل $\mathbf{x} = (x, y, z)$ و زمان t ، و $v(\mathbf{x})$ سرعت صوت در محیط انتشار است.

اصل و شرط تصویرسازی، قلب الگوریتم مهاجرت زمانی معکوس محسوب می‌شوند. افرادی زیادی تاکنون روی شرط تصویرسازی کار کرده‌اند. کلربوت (۱۹۷۱) اصل تصویرسازی را این چنین تعریف کرد، "بازتابنده‌های زیر سطحی در نقاطی

وجود خواهند داشت که زمان اولین ورودی میدان موج پایین‌رونده و بالارونده همزمان باشند" [۶].

در روش RTM، میدان‌های موج چشمه و گیرنده با استفاده از حل کامل معادله موج (معادله ۱)، برونابی می‌شوند. مرحله نهایی اعمال شرط تصویرسازی برای استخراج تصویر زیرسطحی است [۶، ۷]. تصویر به طور سنتی با به کارگیری شرط تصویرسازی همبستگی عرضی تأخیر زمانی صفر بین میدان‌های موج چشمه و گیرنده بیان شده، ایجاد می‌شود. همبستگی عرضی تأخیر زمانی صفر بین میدان‌های موج چشمه و گیرنده به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$I(\mathbf{x}) = \int_0^{T_{\max}} s(\mathbf{x}, t) r(\mathbf{x}, t) dt \quad (2)$$

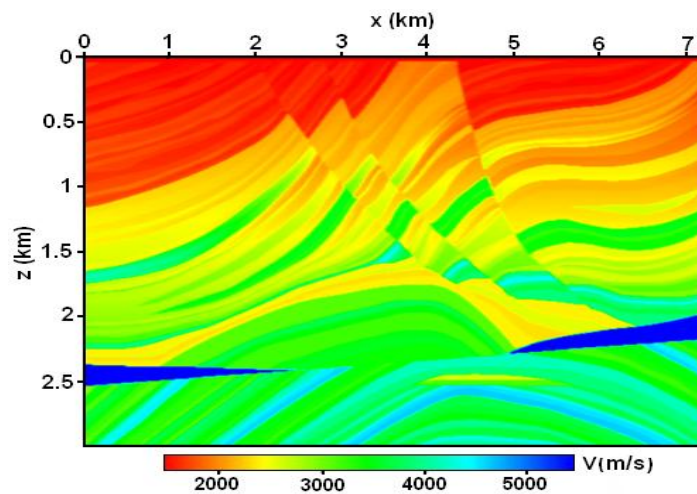
به طوری که، $s(\mathbf{x}, t)$ میدان موج چشمه و $r(\mathbf{x}, t)$ میدان موج گیرنده می‌باشند که در مکان \mathbf{x} و زمان t ، به ترتیب به صورت پیشرو و پسرو برونابی شده‌اند، T_{\max} بیانگر حداکثر زمان برونابی است.

محققین مختلفی شرط تصویر سازی معادله ۲ را مبنای کار خود قرار داده و به شیوه‌های گوناگون سعی در بهبود آن داشته‌اند [۸-۱۱]. علاوه بر آن یون و مارفرت (۲۰۰۶) از اطلاعات بردار پوئین‌تینگ در جهت ارائه یک فیلتر برای حذف نوفه‌های فرکانس پایین استفاده کردند [۱۲]. فیلتر ارائه شده توسط آن‌ها، صرفاً بر اساس حفظ اطلاعات مربوط به زوایای کمتر از ۶۰ درجه بنا نهاده شده بود، به طوری که علاوه بر حذف نوفه باعث از دست رفتن بخش زیادی از اطلاعات مطلوب مربوط به زوایای بازتاب ۶۰ تا ۹۰ درجه می‌شد. همچنین آروجو و همکاران از بردارهای پوئین‌تینگ برای جداسازی میدان موج برای تولید گروه تصویر مشترک در جهت حذف نوفه استفاده کردند. اساس کار آن‌ها بر مبنای تولید دو تصویر مجزا برای زوایای ۰ تا ۶۰ درجه و ۶۱ تا ۹۰ درجه بنا نهاده شده بود. آن‌ها در این راستا فقط از شرط تصویرسازی سنتی معادله ۲ استفاده کرده و سپس از فیلتر بالاگذر برای حذف نوفه‌های مربوط به زوایای ۶۱ تا ۹۰ درجه استفاده کردند. تصویر نهایی، در نهایت با ترکیب دو تصویر بالا به دست می‌آمد. این امر علاوه بر حذف برخی اطلاعات مطلوب، نیازمند انجام دو فرایند مجزا و زمانبر است [۱۳].

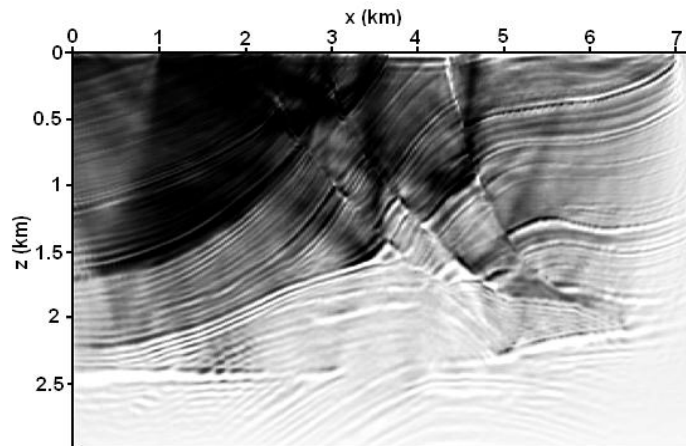
در مقاله حاضر ابتدا برخی از روش‌های حذف نوفه‌های فرکانس پایین همانند فیلتر لاپلاسی، فیلتر بالاگذر و شرط تصویرسازی بر اساس مؤلفه‌های پایین رونده میدان موج معرفی و نتایج آنها ارائه شده است. در ادامه به ارائه شرط

به طور کلی، دامنه و کیفیت تصویر مهاجرت داده شده توسط عواملی نظیر خطا در مدل سرعت، منظم سازی داده ها، حذف نوفه و دیگر عوامل تحت تأثیر قرار می گیرد [۱۵]. علاوه بر عوامل رایج بیان شده، عوامل ویژه روش مهاجرت زمانی معکوس، نظیر انتخاب نوع شرط تصویرسازی مناسب و حذف نوفه های فرکانس پایین وجود دارد که می تواند دامنه و کیفیت تصویر را تحت تأثیر قرار می دهد [۱۶، ۱۷]. به رغم قابلیت بالای روش RTM در تصویر کردن ساختارهای پیچیده با انبوهی از امواج واژگون شده و دارای جهت افقی، شرط تصویرسازی معادله ۲ برای همبستگی عرضی بین میدان های موج برونمایی شده از چشمه و گیرنده، به ترتیب به صورت پیشرو و پسرو استفاده می شود. شرط تصویرسازی بیان شده همه انواع امواج شامل امواج سر^۳، امواج واژگون شده^۴ و امواج منشوری^۵ را همبسته می کند، همین مسئله باعث تولید پدیده های کاذب در تصویر مهاجرت یافته می شود (شکل ۲).

تصویرسازی نوینی پرداخته شده است که در آن از بردارهای پوئین تینگ برای جداسازی میدان های موج و همچنین محاسبه زوایای بازتاب برای معرفی یک تابع وزن دار استفاده شده است. شرط تصویرسازی بیان شده به منظور حذف یا تعدیل نوفه های فرکانس پایین استفاده می شود. فرایند حذف نوفه های فرکانس پایین بر روی داده های مدل مارموزی^۲ آزمایش شده است. این مدل در سال ۱۹۸۸ توسط انستیتو نفت فرانسه ساخته شده است (شکل ۱). مجموعه داده های مارموزی بسیار ابهام برانگیز بوده و بر مبنای تشکیلات زمین شناسی دریایی در کشور آنگولا (افریقا) طراحی شده است. این داده ها معرف یکسری لایه ها است که توسط چندین گسل قطع شده و همچنین در برگیرنده دو تاقدیس است که تاقدیس بالایی روی قسمت فوقانی تاقدیس پایینی قرار گرفته است. تاقدیس پایینی برای تجمع مواد هیدروکربوری بسیار امیدبخش است، اما در عین حال تصویر نمودن آن بسیار مشکل است. در حال حاضر این مسئله اثبات شده است که داده های مارموزی برای بهبود روش های تصویرسازی بسیار با ارزش می باشند [۱۴].



شکل ۱: تغییرات سرعت مدل مارموزی [۱۴]



شکل ۲: تصویر مهاجرت عمقی در روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی معادله ۲

۲- حذف نوفه‌ها در روش RTM

برای حذف پدیده‌های کاذب از روش‌های مختلفی استفاده شده است که از جمله می‌توان به استفاده از فیلتر لاپلاسی و استفاده فیلتر بالاگذر اشاره کرد [۱۸، ۱۹]. با توجه به این‌که پدیده‌های کاذب اغلب فرکانس پایینی دارند از فیلتر بالاگذر به‌منظور حذف این دسته از نوفه‌ها استفاده می‌شود. از معایب این روش حذف برخی از اطلاعات مفید با فرکانس پایین بوده و نوعاً قسمتی از نوفه‌ها همچنان باقی خواهد ماند (شکل ۳- الف). استفاده از فیلتر کردن لاپلاسی بر مبنای معادله ۳ انجام می‌شود [۱۸]

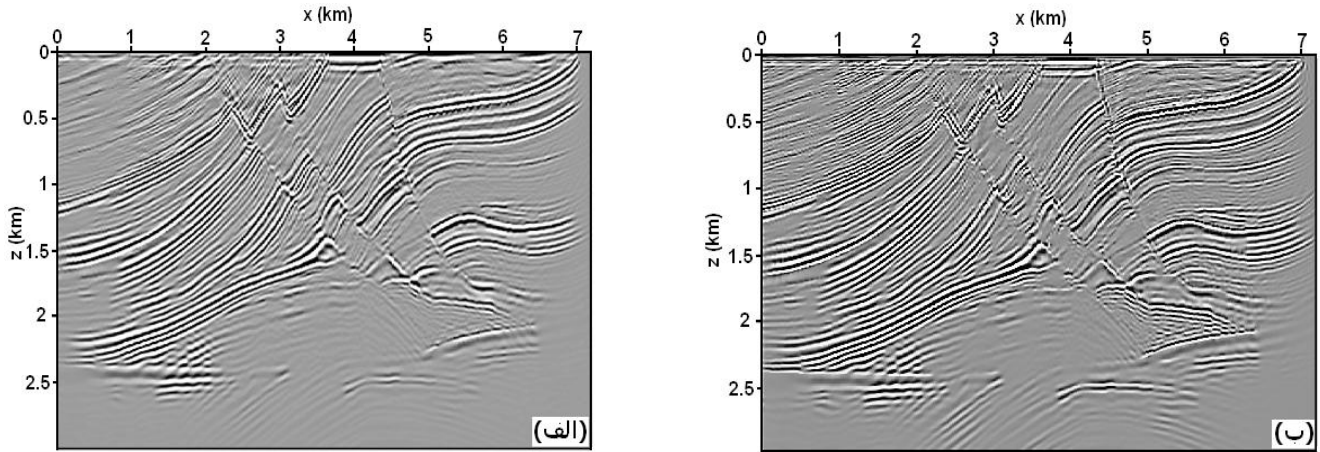
$$I'(x) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \quad (3)$$

که در آن $I(x)$ تصویر مهاجرت یافته با استفاده از معادله ۳ بوده و $I'(x)$ نتیجه اعمال فیلتر لاپلاسی است. نتایج اعمال فیلتر لاپلاسی روی داده‌های مدل مارموزی نیز در شکل ۳- ب نشان داده شده است. از مشکلات عمده در استفاده از

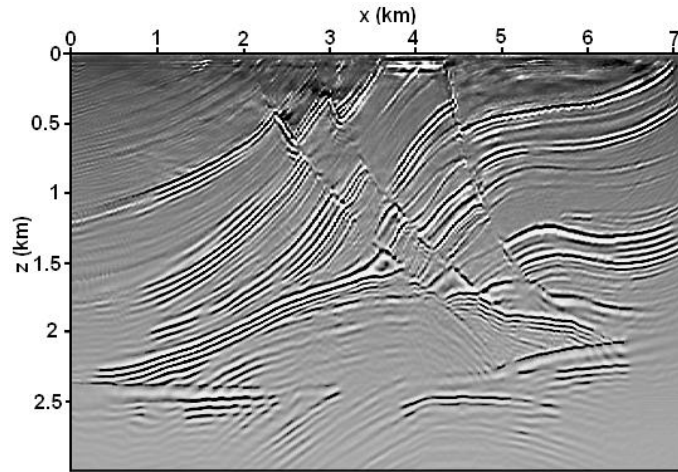
فیلتر کردن لاپلاسی، معکوس‌سازی یا تغییر فاز^۶ است که در حوزه فرکانس به خوبی قابل مشاهده است و بایستی اصلاح شود. همچنین به‌کارگیری این فیلتر باعث تغییر دامنه $I(x)$ می‌شود. از دیگر معایب آن، افزایش نوفه‌های فرکانس بالا و حذف اطلاعات مطلوب با فرکانس پایین است. همچنین بالکائو (۲۰۰۴)، از شرط تصویرسازی به‌صورت معادله ۴، بر مبنای جداسازی میدان موج و استفاده از مؤلفه‌های پایین رونده آن، برای حذف نوفه‌های فرکانس پایین استفاده کرد [۲۰].

$$I(x) = \sum_{t=0}^{t_{\max}} S_d(x, t) R_d(x, t) \quad (4)$$

که در آن $S_d(x, t)$ و $R_d(x, t)$ به ترتیب مؤلفه‌های پایین رونده میدان موج از چشمه و گیرنده می‌باشند.



شکل ۳: تصویر مهاجرت یافته شکل ۲، (الف) پس از اعمال فیلتر بالاگذر (ب) پس از اعمال فیلتر لاپلاسی



شکل ۴: تصویر مهاجرت یافته با استفاده از مؤلفه‌های پایین رونده میدان موج

مؤلفه‌های پایین‌رونده و بالارونده و همچنین تعیین زوایای بازتاب برای به‌کارگیری یک تابع وزن‌دار استفاده می‌شود. شرط تصویرسازی پیشنهادی بر مبنای اطلاعات به‌دست آمده از بردارهای پوئین تینگ به‌صورت زیر معرفی می‌شود.

$$\frac{\int_0^{t_{\max}} [S_d(x,t)R_u(x,t) + S_u(x,t)R_d(x,t)] W(\theta) dt}{\int_0^{t_{\max}} S^2(x,t)} \quad (6)$$

به‌طوری‌که $R_u(x,t)$ و $R_d(x,t)$ ، $S_u(x,t)$ ، $S_d(x,t)$ به‌ترتیب مؤلفه‌های میدان موج پایین‌رونده و بالارونده جداسازی شده چشمه و گیرنده، و $S^2(x,t)$ عبارت نرمال‌کننده چشمه می‌باشند. $W(\theta)$ تابع وزن‌دار و θ زاویه

۲-۱- شرط تصویرسازی نوین

با استفاده از جهت انتشار میدان‌های موج چشمه و گیرنده‌ها، می‌توان اطلاعات بردار پوئین تینگ را برای بهبود کیفیت تصویر محاسبه کرد. یون و مافرت (۲۰۰۴)، بردارهای پوئین تینگ را به‌عنوان حاصل ضرب مشتق میدان موج نسبت به زمان در گرادیان آن به‌صورت معادله ۵، محاسبه کرد [۲۱].

$$\mathbf{J}(x,t) = -\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} \nabla P(x,t) \quad (5)$$

به‌طوری‌که $\mathbf{J}(x,t)$ بردار پوئین تینگ و $P(x,t)$ میدان موج می‌باشند.

همان‌طور که اشاره شد، در مطالعه حاضر برای حذف نوفه‌های فرکانس پایین، شرط تصویرسازی جدیدی ارائه می‌شود که در آن از بردارهای پوئین تینگ برای جداسازی میدان موج به

$$\beta = \arctan\left(\frac{J_z}{J_x}\right) \quad (8)$$

که در آن β ، J_x و J_z به ترتیب زاویه انتشار میدان موج منتشره و بردارهای پوئین تینگ در جهت افقی و قائم می‌باشند. میدان موج در شرایط $\beta \in [0, -\pi]$ پایین‌رونده و در شرایط $\beta \in [0, \pi]$ بالارونده در نظر گرفته می‌شود.

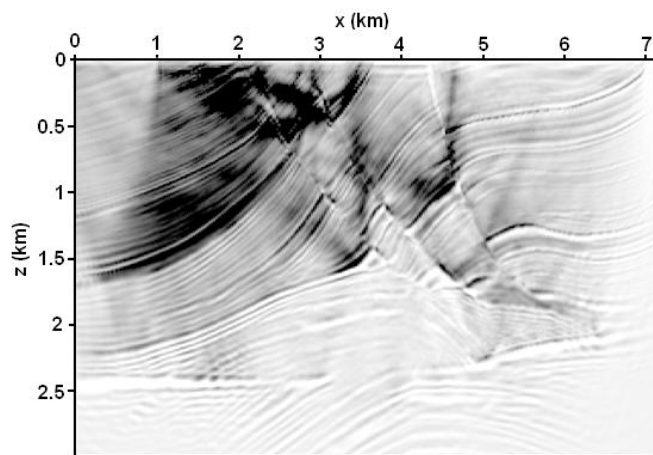
تصویر حاصل با استفاده از شرط تصویرسازی معادله ۶ و بدون در نظر گرفتن تابع وزن‌دار به صورت شکل ۵ است.

بازتاب استکه با استفاده از زاویه بین موج تابشی و بازتاب شده γ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\gamma = 2\theta = \arccos \frac{\mathbf{J}_S \cdot \mathbf{J}_R}{|\mathbf{J}_S| |\mathbf{J}_R|} \quad (7)$$

که در آن \mathbf{J}_R و \mathbf{J}_S به ترتیب بردارهای پوئین تینگ چشمه و گیرنده می‌باشند.

همچنین جداسازی میدان‌های موج به مؤلفه‌های پایین‌رونده و بالارونده با استفاده از بردارهای پوئین تینگ و از طریق رابطه ارائه شده توسط آروجو و همکاران (۲۰۱۴) به صورت زیر انجام می‌گیرد [۱۲].



شکل ۵: تصویر عمقی در روش RTM با اعمال شرط تصویرسازی معادله ۶ و بدون در نظر گرفتن تابع وزن‌دار

۶۰ درجه نسبتاً خوب انجام گرفته است. اما در عین حال قسمتی از اطلاعات مطلوب به‌ویژه در بالای ساختار مورد نظر (شکل ۶-الف، اعماق کم) از دست رفته است. از طرف دیگر در استفاده از زوایای بازتاب ۶۱ تا ۹۰ درجه، نوفه‌های فرکانس پایین ناشی از همبستگی در نقاط غیر بازتابی شدت تصویر را پوشانده است (شکل ۶-ب).

با توجه به آنچه گفته شد، در مطالعه حاضر علاوه بر جداسازی میدان موج، تابع وزن‌دار $W(\theta)$ به منظور حفظ اطلاعات مطلوب در دامنه ۰ تا ۶۰ درجه و حذف نوفه‌های تولید شده در زوایای ۶۱ تا ۹۰ درجه به صورت زیر اعمال شد.

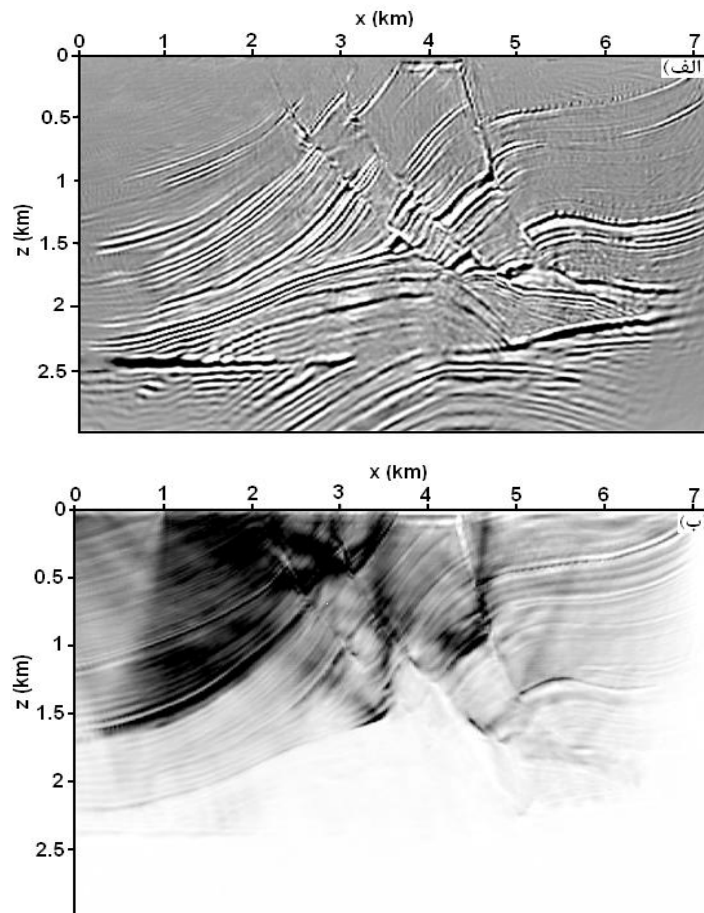
همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، همبستگی عرضی بین میدان‌های موج بالارونده و پایین‌رونده در مقایسه با شرط تصویرسازی سنتی معادله ۲، به مقدار قابل توجهی نوفه‌های فرکانس پایین را خنثی می‌کند، اما کماکان نوفه‌های فرکانس پایین، ناشی از همبستگی عرضی بین امواج در نقاط غیربازتابی تولید می‌شوند.

با توجه به تولید نوفه‌های فرکانس پایین در زوایای بازتاب بزرگ، این نوع نوفه‌ها اغلب در زوایای بازتاب بالاتر از ۶۰ درجه شروع به تولید می‌کنند. تصویر مهاجرت یافته نهایی تولید شده با استفاده از شرط تصویرسازی معادله ۶، پس از جداسازی میدان‌های موج و بدون در نظر گرفتن تابع وزن‌دار $W(\theta)$ برای زوایای بازتاب ۰ تا ۶۰ درجه و ۶۱ تا ۹۰ درجه به ترتیب در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶-الف، دیده می‌شود، در این تصویر حذف نوفه‌های فرکانس پایین برای زوایای بازتاب کوچک‌تر از

تقسیم‌بندی از جهت افزایش ضریب خنثی‌سازی نوفه‌های تولید شده است که افزایش آن با افزایش زاویه بازتاب نسبت مستقیم دارد. شرط تصویرسازی معادله ۶، نه تنها فرایند تولید تصویر را به یک فرایند واحد تبدیل کرده بلکه علاوه بر حفظ اطلاعات مطلوب در زوایای بازتاب کمتر از ۶۰ درجه، نوفه‌های شاخص روش RTM در زوایای بزرگتر از ۶۰ درجه را نیز خنثی می‌کند.

$$W(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq \theta \leq 60^\circ \\ \cos^n(\theta) & \text{if } 60^\circ < \theta \leq 90^\circ \quad \forall n = 1, 3/2, 2 \end{cases} \quad (9)$$

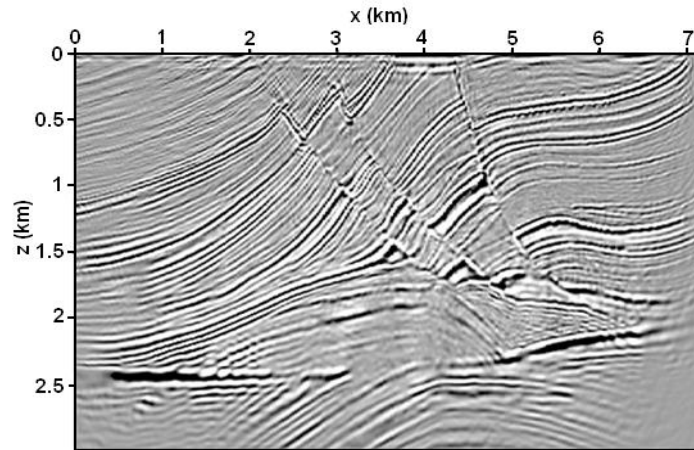
با توجه به افزایش نوفه با بزرگ تر شدن زاویه بازتاب، در تابع وزن دار بالا، دامنه زاویه‌ای ۶۱ تا ۹۰ درجه به سه زیر دامنه ۶۱ تا ۷۰، ۷۰ تا ۸۰ و ۸۰ تا ۹۰ درجه تقسیم شده است، به طوری که بر اساس زاویه بازتاب θ هر دامنه به ترتیب دارای وزن $\cos \theta$ ، $\cos^{3/2} \theta$ و $\cos^2 \theta$ خواهد بود. اهمیت این



شکل ۶. تصویر مهاجرت یافته عمقی در روش RTM با اعمال شرط تصویرسازی معادله ۶ و بدون در نظر گرفتن تابع وزن دار. (الف) برای زوایای بازتاب ۰ تا ۶۰ درجه، (ب) برای زوایای بازتاب ۶۱ تا ۹۰ درجه

کامل معادله ۶ را نشان می‌دهد که در آن حذف نوفه‌های فرکانس پایین به خوبی انجام شده است. همچنین تمامی ساختارهای مورد نظر بخوبی تصویر شده‌اند.

همچنین لازم به ذکر است که عبارت نرمال‌کننده شرط تصویرسازی، بر اساس انرژی چشمه در نقاط تصویرسازی، باعث افزایش روشنایی تصویر مهاجرت یافته می‌شود. شکل ۷، تصویر مهاجرت یافته عمقی با استفاده از شرط تصویرسازی



شکل ۷: تصویر مهاجرت یافته عمقی در روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی معادله ۶

۳- نتیجه گیری

در این مقاله برخی از روش‌های حذف نوفه‌های فرکانس پایین همانند فیلتر بالاگذر، فیلتر لاپلاسی و استفاده از شرط تصویرسازی بر مبنای استفاده از مؤلفه‌های پایین رونده میدان موج ارائه و معایب هر یک بیان شد. در ادامه شرط تصویرسازی نوینی بر اساس اطلاعات بردارهای پوئین تینگ ارائه شد. در شرط تصویرسازی ارائه شده با محاسبه بردارهای پوئین تینگ میدان‌های موج به مؤلفه‌های پایین رونده و بالارونده تفکیک شد. همچنین با استفاده از اطلاعات بردارهای پوئین تینگ، زوایای بازتاب محاسبه و بر همین اساس یک تابع وزن دار به منظور حذف نوفه‌های تولید شده در زوایای بازتاب بزرگتر از ۶۰ درجه معرفی شد. نتیجه حاصل از به کارگیری شرط تصویرسازی معرفی شده در روش RTM، ارائه یک فرایند واحد برای تولید تصویر عمقی مهاجرت یافته با حفظ اطلاعات مربوط به زوایای کمتر از ۶۰ درجه همراه با خنثی سازی نوفه‌های تولید شده در زوایای بازتاب بزرگتر از ۶۱ درجه و افزایش وضوح و روشنایی در تصویر نهایی مربوط به ساختارهای زیر سطحی است.

مراجع

- [3] Whitmore, D. N.; 1983; "Iterative depth imaging by back time propagation", 53rd Ann Inter. Mtg, Soc. Expi. Geophys., Expanded Abstracts, 382-385.
- [4] McMechan, G. A.; 1983; "Migration by extrapolation of time-dependent boundary values", Geophysical Prospecting, **31**, 413-420.
- [5] Baysal, E.; Kosloff, D.D. and Sherwood, J.W.C.; 1983; "Reverse-time migration", Geophysics, **48**, 1514-1524.
- [6] Claerbout, J. F.; 1971; "Toward a unified theory of reflector mapping", Geophysics, **36**, 467-481.
- [7] Fernandez, A. B.; 2010; "Subsalt seismic imaging illumination study", M.Sc. thesis. University of Houston.
- [8] Pestana, R.C., dos Santos, A.W.G. and Araujo E. S.; 2013; "RTM imaging condition using impedance sensitivity kernel combined with Poynting vector", 13th Inter. Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGF), Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29.
- [9] Jin, H.; McMechan, G. A. and Guan H.; 2014; "Comparison of methods for extracting ADCIGs from RTM", Geophysics **79**, 3, 89 -103.
- [10] Chen, T. and Huang, L.; 2014; "Imaging steeply-dipping fault zones using elastic reverse-time migration with a combined wave-field separation and Poynting vector imaging condition". Proc. 39th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, Feb. 24-26, 2014, SGP-TR-202.

[1] Liu, F.; Zhang, G.; Morton, S. A. and Leveille, J. P.; 2011; "An effective imaging condition for reverse-time migration using wavefield decomposition", Geophysics, **76**, S29-S39.

[2] Hemon, C., 1978. "Equations d'onde et modeles". Geophysical prospecting, **26**, 790- 821.

- [16] Zhang, Y. and Sun, J.; 2009; “*Practical issues in reverse-time migration: True amplitude gathers, noise removal and harmonic-source encoding*”, *First Break*, **26**, 19–25.
- [17] Guitton, A.; Valenciano, A.; Bevc, D. and Claerbout, J.; 2007; “*Smoothing imaging condition for shot profile migration*”, *Geophysics*, **72**, S149-S154.
- [19] Youn, D. K. and Zhou, H.; 2001; “*Depth imaging with multiples*”, *Geophysics* **66**, 246-255.
- [20] Bulcão, A.; 2004; “*Modelagem e migração reversa no tempo empregando operadores elásticos e acústicos*”, Ph.D. thesis, Federal University of Rio de Janeiro.
- [21] Yoon, K.; Marfurt, K. J. and Starr W.; 2004; “*Challenges in reverse-time migration*”, 74th Ann. Inter. Mtg., Soc. Expi. Geophys. Expanded Abstracts, 1057-1060.
- [11] Shen, P. and Albertin, U; 2015; “*Up-Down separation using Hilbert transformed source for causal imaging condition*” SEG, Technical Program Expanded Abstracts, 4175-4179.
- [12] Yoon, K. and Marfurt, K. J.; 2006; “*Reverse-time migration using the poynting vector*”, *Exploration Geophysics*, **37**, 102-107.
- [13] Araujo, E.S.; Pestana, R.P. and do Santos A.W.G.; 2014; “*Symplectic scheme and the Poynting vector in reverse-time migration*”, *Geophysics* **79**, 1-10.
- [14] Versteeg, R. J.; 1993; “*Sensitivity of prestack depth migration to the velocity model*”, *Geophysics*, **58**(6), 873-882.
- [15] Jones, I. F. and Fruehn, J. K.; 2003; “*Factors affecting frequency content in preSDM imaging*”, *The Leading Edge*, **22**, 128-134.

¹ Reverse time migration (RTM)

² Marmousi

³ Head wave

⁴ Turning wave

⁵ Prismatic wave

⁶ Phase inversion