

معرفی یک شرط تصویرسازی جدید و کارآمد در روش مهاجرت زمانی معکوس

فرزاد مرادپوری*

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان

(دریافت: شهریور ۱۳۹۷، پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۸)

چکیده

روش مهاجرت زمانی معکوس (Reverse Time Migration) به عنوان یک روش تصویرسازی لرزه‌ای نوین، با حل دو طرفه معادله موج و از طریق یک فرایند سه مرحله‌ای شامل برون‌یابی پیشرو و پسرو میدان موج چشمه و گیرنده و اعمال یک شرط تصویرسازی مناسب اجرا می‌شود. این روش همه انواع موج را بدون هیچ محدودیت زاویه‌ای مدلسازی می‌کند، این امر با توجه به ضعف روش‌های تصویرسازی پرتو- مبنا و حل یک طرفه موج در تصویر نمودن درخور ساختارهای موجود در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، بسیار حائز اهمیت است. علی‌رغم برتری‌های گفته شده، نوفه‌های فرکانس پایین که عمدتاً در زاویه‌های بازتاب بزرگ تولید می‌شوند (۶۰ تا ۹۰ درجه)، محدودیت عمده روش RTM به شمار می‌آید که تصویر مهاجرت یافته را پوشش داده و کیفیت آن را کاهش می‌دهند. لذا هدف از مقاله حاضر آن است که با بهبود شرط تصویرسازی به عنوان قلب روش RTM، ضمن حذف نوفه‌های فرکانس پایین، اطلاعات مفید مربوط به زاویه‌های بازتاب ۶۰ تا ۹۰ درجه را حفظ و از آنها در جهت تولید یک تصویر با کیفیت بهتر استفاده نماید. این کار با ارائه یک شرط تصویرسازی نوین و با اضافه نمودن یک تابع وزنی بر اساس زاویه‌های بازتاب انجام شده است. در نهایت نتایج روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی جدید ارائه و با نتایج برخی روش‌های سنتی و مدرن مشابه مقایسه شده است.

کلید واژه‌ها

مهاجرت زمانی معکوس، محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده، نوفه‌های فرکانس پایین، شرط تصویرسازی

* عهده دار مکاتبات: moradpouri.fa@lu.ac.ir

۱- مقدمه

همانند ساختارهای پرشیب و یا برآمدگی‌هایی مثل گنبد نمکی مواجه گردد، مسئله‌ای که فراتر از حیطه عملکرد الگوریتم‌های مهاجرت معادله موج یک طرفه است [۶]. علاوه بر مزیت‌های روش RTM، نوفه‌های با دامنه بلند و فرکانس پایین از شاخصه‌های این روش است که کیفیت تصویر را به شدت کاهش می‌دهد. از این رو حذف و یا کاهش این نوفه‌ها یکی از چالش‌های عمده این روش است [۷].

۲- تصویرسازی به روش RTM

معادله موج صوتی به طور گسترده‌ای در مدلسازی پیشرو و مهاجرت زمانی معکوس داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. این معادله به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۸،۹].

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

به طوری که $p(\mathbf{x}, t)$ میدان موج لرزه‌ای، $v(\mathbf{x})$ سرعت انتشار (ثابت فرض می‌شود)، t زمان و ∇ عملگر لاپلاسین است.

مهاجرت زمانی معکوس داده‌های لرزه‌ای با حل عددی دو طرفه معادله (۱) و طی سه مرحله اصلی شامل برونیابی پیشرو میدان موج چشمه^۱، برون‌یابی پسرو میدان موج گیرنده^۲ و اعمال شرط تصویرسازی^{۱۱} انجام می‌شود. برای تصویرسازی داده‌های لرزه‌ای به روش RTM، برون‌یابی پیشرو میدان موج چشمه به صورت پیشرو در زمان، از یک سیگنال چشمه مصنوعی شبیه‌سازی شده در زمان صفر برون‌یابی می‌گردد. همچنین برون‌یابی پسرو میدان موج گیرنده از انرژی بازتابی که رو به بالا سیر کرده و در گیرنده ثبت شده است و از سیگنال‌های دریافت شده در سطح زمین، شروع شده و میدان موج گیرنده به صورت پسرو در زمان، برون‌یابی می‌شود. در نهایت با اعمال شرط تصویرسازی بر روی میدان‌های موج برون‌یابی شده چشمه و گیرنده و همبسته کردن آنها، تصویر نهایی زیرسطحی تولید می‌گردد [۳،۵،۱۰].

به علت حل دو طرفه میدان موج (حل کامل معادله موج) و ادامه برون‌یابی میدان موج چشمه در طرف گیرنده و برون‌یابی میدان موج گیرنده در طرف چشمه، همبستگی عرضی بین این دو میدان موج نه تنها در نقاط بازتابی، بلکه در نقاط غیر بازتابی و در تمام مسیر انتشار میدان موج رخ

الگوریتم‌های تصویرسازی عمقی (مهاجرت عمقی) عموماً در دو گروه روش‌های پرتو- مبنا^۱ و معادله موج- مبنا^۲ طبقه‌بندی می‌شوند و هر گروه نیز می‌تواند به زیرمجموعه‌هایی تقسیم شود. روش‌های پرتو- مبنا شامل روش‌های مهاجرت کیرشلف^۳ و اشعه^۴ است، حال آنکه گروه معادله موج- مبنا شامل مهاجرت یک طرفه معادله موج^۵ (ادامه فروسو) و مهاجرت دو طرفه (کامل)^۶ معادله موج صوتی است [۱]. مورد دوم تحت عنوان مهاجرت زمانی معکوس (RTM) شناخته می‌شود و از طریق حل کامل معادله موج میسر می‌شود. از جمله مزایای روش‌های پرتو- مبنا، حجم محاسباتی و هزینه کم‌تر آنها نسبت به روش‌های معادله موج- مبنا است، اما این نوع روش‌های تصویرسازی در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده و دارای ساختارهای پرشیب با مشکل مواجه می‌شوند [۲]. در مقابل روش‌های معادله موج- مبنا دارای حجم محاسباتی بالا بوده، اما در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده کارایی بهتری در تصویر نمودن ساختارهای زیرسطحی، به ویژه ساختارهای پرشیب از خود نشان می‌دهند [۳]. روش‌های مهاجرت معادله موج یک طرفه در مواردی که امواج با یک زاویه خاص از جهت اصلی (معمولاً جهت عمودی) انتشار می‌یابند، خوب عمل می‌کنند، اما در مورد امواجی که با زاویه نزدیک ۹۰ درجه یا بیش‌تر انتشار می‌یابند (انتشار تقریباً افقی)، با شکست روبرو می‌شوند؛ بنابراین روش مهاجرت معادله موج یک طرفه نمی‌تواند بازتابنده‌های با شیب تند در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده را به خوبی تصویر کند [۳-۵].

از طرف دیگر، مهاجرت زمانی معکوس (RTM)، معادله موج صوتی کامل (دو طرفه) را به ازای انتشار میدان موج حل می‌کند. بنابراین انتشار موج در همه جهات را شبیه‌سازی می‌کند و در نتیجه محدودیت‌های زاویه‌ای را برطرف نموده و همه انواع موج از جمله امواج منشوری^۷ و وارون شده^۸ را نیز تصویر می‌کند. به همین دلیل، کارآمدی آن به عنوان الگوریتم اصلی تصویرسازی در موارد مناطق زمین‌شناختی پیچیده بسیار اهمیت می‌یابد [۶]. این مسئله زمانی بیش‌تر اهمیت می‌یابد که عملیات اکتشاف مواد هیدروکربوری با ساختارهای زمین‌شناسی بسیار پیچیده‌ای

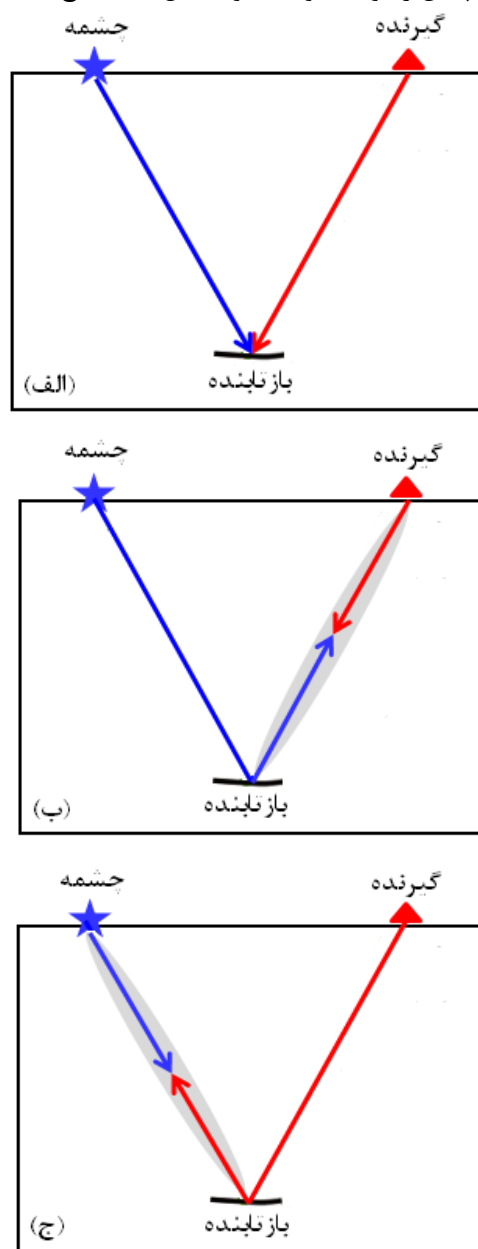
$$I(x) = \int_{t=0}^{t_{\max}} S(x,t)R(x,t)dt \quad (2)$$

به طوری که $I(x)$ مقدار تصویر مهاجرت یافته در مکان x و زمان t ، $S(x,t)$ میدان موج برونیابی شده چشمه و $R(x,t)$ میدان موج پسرو برونیابی شده از گیرنده در موقعیت x و زمان t است و t_{\max} بیشینه زمان ثبت رکورد است.

استفاده از شرط تصویرسازی رابطه (۲)، فقط در مورد بازتابنده‌های با شیب کم و محیط‌های با امپدانس صوتی کم، نتایج نسبتاً خوبی را به دست می‌دهد. استفاده از این شرط تصویرسازی در مورد محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده و دارای امپدانس صوتی قوی، قادر به تشخیص نوفه‌های همبستگی انجام شده در نقاط بازتابی از غیربازتابی نبوده و منجر به تولید نوفه‌های فرکانس پایین در تصویر شده و کیفیت تصویر مهاجرت یافته را به شدت کاهش می‌دهد [۸]. با توجه به اهمیت اکتشاف تله‌های نفتی در محیط‌های زمین‌شناسی پیچیده و نیاز به استفاده از روش RTM به دلیل برتری آن در تصویر نمودن این گونه محیط‌ها، باید مشکل نوفه‌های فرکانس پایین در این روش را برطرف نمود. تاکنون از روش‌های مختلفی برای کاهش نوفه‌های فرکانس پایین روش RTM استفاده شده است که از جمله آنها می‌توان به اعمال فیلتر بالاگذر^{۱۳} و یا فیلتر لاپلاسین^{۱۴} اشاره کرد. مشکل استفاده از فیلتر بالاگذر به همپوشانی باند فرکانسی سیگنال و نوفه در روش اول برمی‌گردد که باعث از دست رفتن بخشی از اطلاعات مفید خواهد شد [۱۳]. همچنین فیلتر لاپلاسین باعث تغییر دامنه و فاز در سیگنال مفید خواهد شد، که خود نیازمند اصلاح است. علاوه بر دو روش بالا محققین زیادی بر روی شرط تصویرسازی و بهبود آن به روش‌های مختلف تحقیق نموده‌اند [۱۲، ۱۴-۱۸].

در مطالعه حاضر شرط تصویرسازی نوینی ارائه شده که قابلیت آن را دارد تا اطلاعات بازتابی مربوط به همه امواج را بدون محدودیت زاویه‌ای، لحاظ نماید. شرط تصویرسازی ارائه شده به گونه‌ای طراحی شده است تا علاوه بر خنثی نمودن نوفه‌های فرکانس پایین روش RTM که عمدتاً مربوط به زاویه‌های بازتاب بزرگ (زاویه‌های ۶۰ تا ۹۰) هستند، از اطلاعات مفید مربوط به این دامنه زاویه‌ای در راستای تصویر نمودن درخور ساختارهای زیرسطحی در محیط‌های پیچیده نیز استفاده نماید.

می‌دهد (شکل ۱). همبستگی انجام شده بر روی بازتابنده واقعی، منجر به تولید دامنه واقعی می‌شود (شکل ۱-الف). در مقابل همبستگی انجام شده در نقاط غیربازتابی نوفه‌های فرکانس پایین را تولید خواهد نمود (شکل ۱-ب؛ ج).



شکل ۱: (الف) همبستگی عرضی میدان موج چشمه و گیرنده در نقطه بازتابی (بازتابنده واقعی)، (ب و ج) همبستگی عرضی در نقاط غیر بازتابی (عدم وجود بازتابنده)

اصولاً اعمال شرط تصویرسازی به عنوان قلب روش مهاجرت زمانی معکوس، با استفاده از شرط تصویرسازی سنتی رابطه (۲) انجام می‌شود که شرط تصویرسازی، همبستگی عرضی تاخیر صفر^{۱۲} نامیده می‌شود [۳، ۵، ۹، ۱۱، ۱۲].

۳- توسعه شرط تصویرسازی

همچنین $w(\theta)$ در رابطه (۴) یک تابع وزن دار است که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$w(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq \theta \leq 60^\circ \\ \cos^n(\theta) & \text{if } 60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \quad \forall n=1, \frac{3}{2}, 2 \end{cases} \quad (5)$$

در شرط تصویرسازی کامل رابطه (۴)، برای حفظ اطلاعات مربوط به زاویه‌های بازتاب بزرگ‌تر از 60° درجه، از تابع وزنی رابطه (۵) استفاده شده است که زاویه‌های بازتاب 60° تا 90° درجه را به سه زیر بازه $60^\circ-70^\circ$ ، $70^\circ-80^\circ$ و $80^\circ-90^\circ$ درجه تقسیم و به هر کدام از زیر بازه‌های گفته شده، وزن یکسانی اختصاص یافته است. اضافه نمودن تابع وزن دار گفته شده به شرط تصویرسازی رابطه (۳) و اجرای روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی کامل رابطه (۴)، علاوه بر کاهش قابل توجه نوفه‌های فرکانس، اطلاعات مفید از دست رفته مربوط به زاویه‌های بازتاب بالاتر از 60° درجه را نیز حفظ نموده و به طور کلی ساختارهای زیر سطحی را به نحو بسیار بهتری نسبت به روش‌های پرتو-مبنا و روش معادله موج یک طرفه تصویر می‌کند. با این حال اختصاص یک وزن یکسان به هر زیر بازه از زاویه‌های بازتاب، همه زاویه‌ها از نظر تولید نوفه فرکانس پایین یکسان در نظر گرفته شده است، در حالی که با افزایش زاویه‌های بازتاب، بر میزان تولید نوفه فرکانس پایین افزوده شده و در نظر گرفتن یک وزن یکسان برای همه زاویه‌های هر زیر بازه، کارآمدی آن را کم‌تر می‌کند. از این رو در مطالعه حاضر، جهت رفع کاستی‌های موجود، شرط تصویرسازی رابطه (۴) بهبود یافته و شرط تصویرسازی جدیدی ارائه شده است. در شرط تصویرسازی جدید به هر کدام از زاویه‌های بازتاب به نسبت میزان بزرگ‌تر شدن آنها و در نتیجه افزایش تولید نوفه در آنها، یک وزن یکتا در قالب تابع وزنی $\psi(\theta_i)$ رابطه (۶) اختصاص داده شده است.

$$\psi(\theta_i) = \cos^m(\theta_i) \quad \text{where} \quad m = 1 + \frac{1}{90^\circ + \theta_{i-1}}, \quad (6)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} + 1 \quad \forall \quad \theta_0 = 60 \quad \text{and} \quad i = 1, 2, \dots, 36$$

برخلاف تابع وزنی رابطه (۵)، در تابع وزنی رابطه (۶)، روند کاهندگی نوفه از یک تابع پله‌ای به یک حالت پیوسته تغییر یافته است و در آن ضمن حفظ اطلاعات مفید مربوط به زاویه‌های بازتاب $60^\circ-90^\circ$ درجه، نوفه‌های فرکانس پایین به صورت منطقی‌تری دچار کاهندگی شده‌اند. روند کاهندگی بر حسب زاویه بازتاب برای دو تابع وزنی $w(\theta)$ و $\psi(\theta_i)$ در شکل ۲ نشان داده شده است.

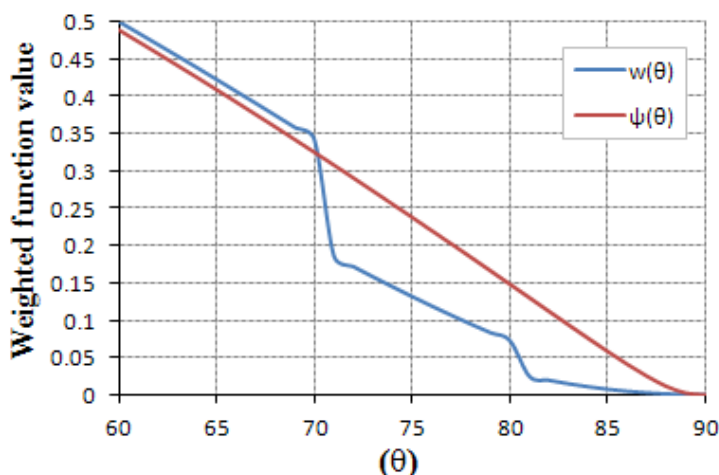
همان طور که اشاره شد، روش‌های مهاجرت معادله موج یک طرفه، در مواردی که امواج با یک زاویه خاص از جهت اصلی (معمولاً جهت عمودی) انتشار می‌یابند، خوب عمل می‌کنند، اما در مورد امواجی که با زاویه‌های بازتاب باز انتشار می‌یابند (انتشار تقریباً افقی) با شکست روبرو شده و قادر به تصویرکردن ساختارهای زیرسطحی به ویژه از نوع پرشیب نیستند. در این گونه موارد روش RTM با توجه به حل کامل معادله موج، عملکرد بسیار خوبی دارد اما همین حل کامل معادله موج باعث تولید نوفه‌های فرکانس پایین در شرط تصویرسازی مورد استفاده خواهد شد. این نوفه‌ها غالباً در در زاویه‌های بازتاب باز (بزرگ) در تصویر مهاجرت یافته پدیدار می‌شوند. یکی از راهکارهای حذف این نوفه‌ها، حذف اطلاعات لرزه‌ای مربوط به زاویه‌های بزرگ‌تر از 60° درجه در پردازش داده‌ها و صفر نمودن وزن آنها در شرط تصویرسازی است. این راهکار هرچند که باعث کاهش قابل توجه نوفه‌های فرکانس پایین در تصویر مهاجرت یافته می‌شود، اما باعث حذف حجم قابل توجهی از سیگنال‌های مفید شده و کیفیت تصویر مهاجرت یافته را به ویژه در مناطق عمق کم تا متوسط کاهش می‌دهد.

مرادپوری و همکاران (۲۰۱۷)، جهت حفظ اطلاعات مربوط به زاویه‌های بازتاب بزرگ و کاهش نوفه‌های فرکانس پایین مربوط به این زاویه‌ها، شرط تصویرسازی را در ابتدا به صورت رابطه (۳) و پس از بهبود و اضافه نمودن تابع $w(\theta)$ به صورت شرط تصویرسازی کامل (رابطه (۴)) ارائه نمودند. آنها ضمن حفظ اطلاعات مفید مربوط به زاویه‌های بازتاب باز (بزرگ)، نوفه‌های فرکانس پایین را به میزان قابل توجهی کاهش دادند [۱۲].

$$I(x) = \int_0^{t_{\max}} \left[\frac{S_d(x,t)R_u(x,t) + S_u(x,t)R_d(x,t)}{S_u(x,t)R_d(x,t)} \right] dt \bigg/ \int_0^{t_{\max}} S^2(x,t) dt \quad (3)$$

$$I(x) = \int_0^{t_{\max}} \left[\frac{S_d(x,t)R_u(x,t) + S_u(x,t)R_d(x,t)}{S_u(x,t)R_d(x,t)} \right] w(\theta) dt \bigg/ \int_0^{t_{\max}} S^2(x,t) dt \quad (4)$$

که در رابطه (۳)، $S_d(x,t)$ ، $S_u(x,t)$ ، $R_d(x,t)$ و $R_u(x,t)$ به ترتیب مولفه‌های میدان موج پایین‌رونده و بالارونده جداسازی شده چشمه و گیرنده، $S^2(x,t)$ عبارت نرمال‌کننده چشمه و θ زاویه بازتاب است که مقدار آن نصف زاویه بازتاب بین موج تابشی و بازتاب شده است.



شکل ۲: مقدار تابع وزنی استفاده شده در شرط تصویرسازی برای زاویه‌های بازتاب ۶۰ تا ۹۰ درجه

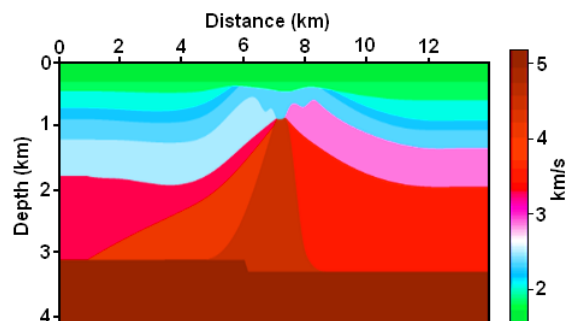
نوفه‌های فرکانس پایین، بخش‌های اصلی مناطق دیاپیر نمکی و ساختارهای اطراف را پوشش داده است و این به همبستگی عرضی میدان‌های موج در نقاط غیر بازتابی بر می‌گردد که شرط تصویرسازی رابطه (۲)، قادر به تشخیص آنها از همبستگی عرضی در نقاط بازتابی نیست.

با توجه آنکه شمار زیادی از همبستگی‌های عرضی در نقاط بازتابی هنگامی رخ می‌دهد که جهت میدان موج چشمه و گیرنده در آنها عکس یکدیگر است، بنابراین انتظار می‌رود که استفاده از شرط تصویرسازی بر اساس مولفه‌های بالارونده و پایین‌رونده میدان موج به کاهش نوفه‌های فرکانس پایین کمک کند. از این رو نتایج روش RTM در قالب استفاده از شرط تصویرسازی رابطه (۳) و بر اساس مولفه‌های بالارونده و پایین‌رونده میدان موج جدا در شکل ۴-ب نشان داده شده است. این شرط حاکی از کاهش قابل توجه نوفه‌های فرکانس پایین به نسبت شکل ۴-الف دارد، اما بخشی از نوفه‌ها در تصویر به ویژه در اعماق کم، همچنان مشاهده شده و در قسمت‌های دیگر تصویر نیز ساختارها به علت حضور نوفه‌ها به وضوح تصویر نشده‌اند.

با توجه به کاستی‌های عنوان شده در تصویرهای شکل‌های ۴-الف و ۴-ب، برای حذف بیشینه نوفه‌ها و همچنین بهبود کیفیت تصویر مهاجرت‌یافته، روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی بهبود یافته رابطه (۴)، اجرا و تصویر مهاجرت‌یافته نهایی در شکل ۵-الف نشان داده شده است. استفاده از تابع وزنی $w(\theta)$ در رابطه (۵) باعث شده است تا ضمن رفع کاستی‌های شرط تصویرسازی رابطه (۳) در کاهش نوفه‌ها، از اطلاعات مفید مربوط به زاویه‌های بازتاب ۶۰-۹۰ درجه نیز در تولید تصویر نهایی استفاده

۴- آنالیز عددی

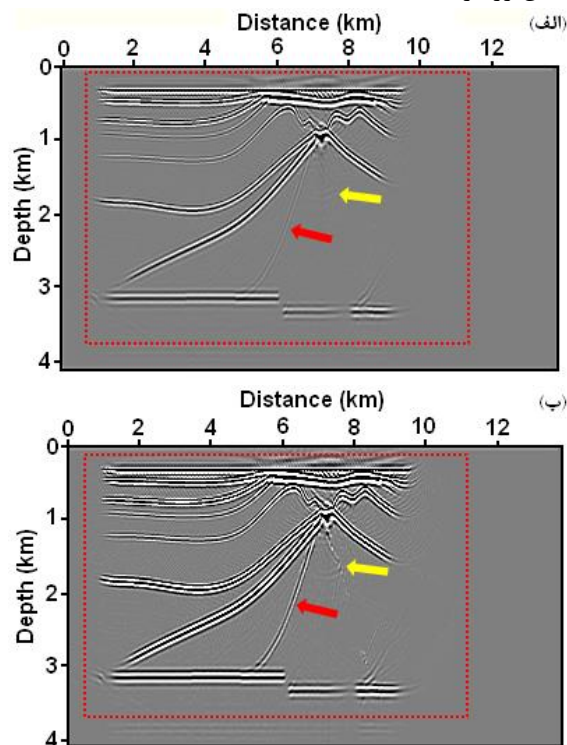
برای مقایسه نتایج روش RTM، شرط تصویرسازی با استفاده از دو تابع وزنی $w(\theta)$ و $\psi(\theta_i)$ بر روی مدل Picrocol اجرا شده است. مدل مصنوعی Picrocol (شکل ۳) یک مدل مصنوعی است که در انستیتو نفت فرانسه طراحی شده است. این مدل متشکل از یک دیاپیر نمکی^{۱۵} است که یکسری لایه‌های افقی را شکافته و باعث چین‌خوردگی و حرکت رو به بالای آنها شده تا جایی که در قسمت بالایی باعث شکستگی این لایه‌ها شده است. داده‌های مصنوعی با استفاده از یک موجک ریکر با فرکانس ۲۵ هرتز و بیشینه فرکانس ۵۰ هرتز تولید شده‌اند. در ساخت این مدل از یک پروفیل لرزه‌ای یک سو گسترش^{۱۶} به طول چهار کیلومتر شامل ۲۰۰ گیرنده استفاده شده و تعداد کل ۸۰ چشمه با چینش ۲۰ با فواصل چشمه ۱۰۰ متر و فواصل گیرنده ۱۰ متر در آن استفاده شده است.



شکل ۳: تغییرات سرعت در مدل Picrocol

تصویر مهاجرت یافته روش RTM با استفاده از شرط تصویرسازی سنتی رابطه (۲)، در شکل ۴-الف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشهود است،

رنگ). در سمت راست ساختار گفته شده نیز قسمتهایی از ساختار پرسیب دیگری از مدل سرعت تصویر شده است که در شکل ۵-الف اثری از آن وجود ندارد (مشخص شده با پیکان زرد رنگ).

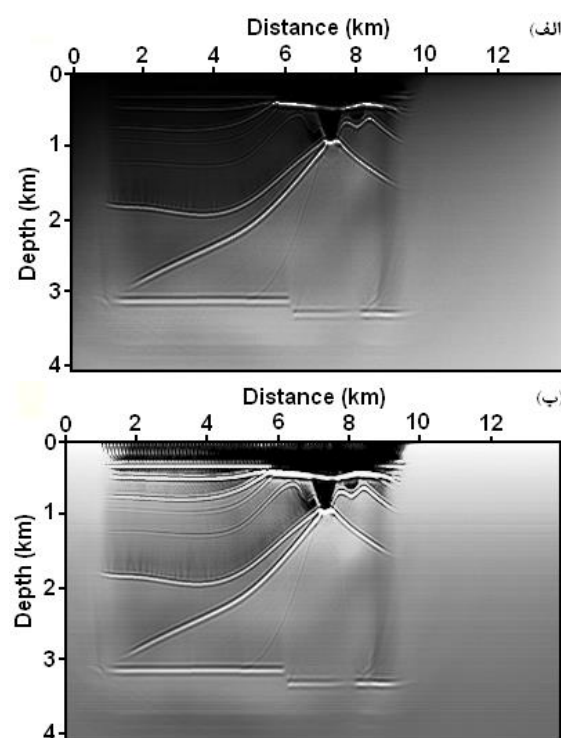


شکل ۵: نتایج روش RTM. با استفاده از شرط تصویرسازی رابطه (۴)، (ب) با استفاده از شرط تصویرسازی رابطه (۶)

۵- نتیجه‌گیری

با توجه حل دو طرفه (کامل) معادله موج صوتی در روش مهاجرت زمانی معکوس (RTM)، این معادله، انتشار موج در همه جهتها را شبیه‌سازی می‌کند، در نتیجه محدودیت‌های زاویه‌ای را برطرف نموده و امواج منشوری و وارون شده را نیز تصویر می‌کند. به همین دلیل در مناطق زمین‌شناختی پیچیده، روش RTM به عنوان الگوریتم اصلی تصویرسازی نسبت به سایر الگوریتم‌های تصویرسازی بسیار مورد توجه است. از طرفی با وجود همه مزیت‌های روش RTM، نوفه‌های فرکانس پایین (به ویژه در زاویه‌های بازتاب بزرگ‌تر از ۶۰ درجه) در این روش از شاخصه‌ها و چالش‌های عمده این روش به شمار می‌رود که به شرط تصویرسازی مورد استفاده در این روش بر می‌گردد. لذا در این مقاله شرط تصویرسازی جدیدی ارائه شده است که نوفه‌های فرکانس پایین تولید شده در دامنه زاویه‌ای ۶۰ تا ۹۰ درجه را به میزان قابل توجهی کاهش داده و همچنین

شود. با این حال همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، در شرط تصویرسازی رابطه (۴)، به هر یک از زیر بازه‌های تعریف شده ۶۱-۷۰، ۷۱-۸۰ و ۸۱-۹۰ وزن یکسانی اختصاص داده شده است که با توجه به رابطه مستقیم افزایش تولید نوفه با زاویه بازتاب، کارایی این شرط تصویرسازی را کم‌تر می‌کند. از این رو برای رفع این مشکل، تابع وزنی جدید $\psi(\theta_i)$ (رابطه ۶) جایگزین تابع $w(\theta)$ گردید که در مورد برتری‌های آن در بخش معرفی توابع وزنی توضیح داده شد.



شکل ۴: نتایج روش RTM. (الف) با استفاده از شرط تصویرسازی سنتی رابطه (۲)، (ب) با استفاده از شرط تصویرسازی رابطه (۳) بر اساس مولفه‌های بالازونده و پایین رونده میدان موج

تصویر مهاجرت‌یافته با استفاده از شرط تصویرسازی جدید ارائه شده در رابطه (۶)، در شکل ۵-ب نشان داده شده است. با مقایسه دو تصویر شکل ۵-الف و شکل ۵-ب، بهبود حاصل شده در کیفیت تصویر شدن ساختارهای موجود در هر دو تصویر به وضوح قابل مشاهده است (کادر قرمز رنگ). همچنین در تصویر شکل ۵-ب، در فاصله ۵ تا ۷ کیلومتر و در عمق ۱ تا ۳ کیلومتر، یک ساختار پرسیب که در مدل سرعت نیز دیده می‌شود، به خوبی تصویر شده است. در حالی که این ساختار در شکل ۵-الف به صورت بسیار ضعیفی دیده می‌شود (مشخص شده با پیکان قرمز

condition for reverse-time migration using wavefield decomposition. *Geophysics*, 76, S29–S39.

[10] Kruger, J. T. (2013). A Semi-Custom Hardware Architecture for Reverse Time Migration. PhD thesis, Ruperto-Carola University of Heidelberg.

[11] Claerbout, J. F. (1971). Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, 36, 467-481.

[12] Moradpouri, F., Moradzadeh, A., Pestana R. C., Ghaedrahmati, R. & Soleimani Monfared, M. (2017). An improvement in wavefield extrapolation and imaging condition to suppress reverse time migration artifacts. *Geophysics*, 82, S403–S409.

[13] Yoon, K. & Marfurt, K. (2004). Challenges in reverse time migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1057-1060.

[14] Yoon, K. & Marfurt, K. J. (2006). Reverse-time migration using the Poynting vector. *Exploration Geophysics*, 37, 102–107.

[15] Crawley, S., Whitmore, N. D., Sosa, A. & Jones, M. (2012). Improving RTM images with angle gathers, Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Las Vegas/EUA.

[16] Shen, P., & Albertin, U. (2015). Up-down separation using Hilbert transformed source for causal imaging condition. *Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts*, 4175–4179.

[17] Wang, W., McMechan, G. A., Tang, C. & Xie, F. (2016). Up/down and P/S decompositions of elastic wavefields using complex seismic traces with applications to calculating Poynting vectors and angle-domain common-image gathers from reverse time migrations. *Geophysics*, 81, S181–S194,

[18] Du, Q., Guo, C., Zhao, Q., Gong, X., Wang, C., & Li, X. Y. (2017). Vector-based elastic reverse time migration based on scalar imaging condition. *Geophysics*, 82, S111–S127.

اطلاعات مفید موجود را نیز حفظ خواهد کرد. این امر با در نظر گرفتن رابطه مستقیم بین افزایش تولید نوفه با افزایش زاویه بازتاب انجام شده است. به گونه‌ای که برای هر زاویه، وزن یکتایی در نظر گرفته شده است تا کاهش نوفه و حفظ اطلاعات مفید به روش واقع گرایانه‌تری انجام شود. در نهایت با استفاده از یک مدل مصنوعی، نتایج روش RTM بر اساس شرط تصویرسازی ارائه شده با نتایج روش RTM بر مبنای شرط تصویرسازی سنتی، شرط تصویرسازی بر اساس مولفه‌های بالارونده و پایین‌رونده میدان موج و یک شرط تصویرسازی مشابه آزمایش و مقایسه شده است.

مراجع

[1] Sava, P. & Hill, S. J. (2009). Overview and classification of wavefield seismic imaging methods. *The Leading Edge*. 28(2), 170-183.

[2] Soleimani, M. (2016). Seismic imaging by 3D partial CDS method in complex media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 143, 54–64.

[3] Moradpouri, F., Moradzadeh, A., Pestana, R. C. & Soleimani Monfared, M. (2017). An improvement in RTM method to image steep dip petroleum bearing structures and its superiority to other methods. *Journal of Mining & Environment*, 8(4), 573-578.

[4] Etgen, J., Gray, S. H. & Zhang, Y. (2009). An overview of depth imaging in exploration geophysics. *Geophysics*, 74(6), WCA5–WCA17.

[5] Moradpouri, F., Moradzadeh, A., Cruz Pestana, R., soleimani Monfared. (2017). 'A new imaging condition based on poynting vectors in RTM seismic imaging method', *Iranian Journal of Mining Engineering*, 11(33), pp. 1-9. (In Persian).

[6] Moradpouri, F., Moradzadeh, A., Pestana, R.C. & Soleimani Monfared, M. (2016). Seismic reverse time migration using a new wave-field extrapolator and a new imaging condition. *Acta Geophysica*, 64(5), 1673-1690

[7] Liu, F., Zhang, G., Morton, A. & Leveille, J. (2007). Reverse-time migration using one-way wavefield imaging condition. 77th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract.

[8] Moradpouri, F., Moradzadeh, A., Cruz Pestana, R. & soleimani Monfared, M. (2015). A new numerical and analytical scheme to solve the full wave equation for seismic modeling based on REM and Leapfrog methods. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 5(10), pp. 41-48. (In Persian)

[9] Liu, F., Zhang, G., Morton, S. A. & Leveille, J. P. (2011). An effective imaging

¹ Ray-based

² Wave equation-based

³ Kirchhoff

⁴ Beam

⁵ One-way wave equation migration

⁶ Two-way wave equation migration (full)

⁷ Prismatic waves

⁸ Overturned

⁹ Source wavefield extrapolation

¹⁰ Receiver wavefield extrapolation

¹¹ Imaging condition

¹² Zero lag cross correlation

¹³ High pass filter

¹⁴ Laplacian filter

¹⁵ Salt diapir

¹⁶ end-on sperad