

## تأثیر مدل سرعت بر نتایج مهاجرت زمان معکوس

هادی مهدوی بصیر\*، عبدالرحیم جواهریان، دانشگاه صنعتی امیر کبیر ■ ظاهر حسین شمالی، دانشگاه تهران ■ شعبانعلی غلامی، مدیریت اکتشاف

## چکیده

مهاجرت زمان معکوس به عنوان پیشرفته ترین روش مهاجرت عمقی پیش برانبارش داده های لرزه ای محسوب می شود. این روش در مناطقی با ساختارهای پیچیده که با تغییرات شدید سرعت جانبی و شیب های بسیار زیاد همراه هستند می تواند به خوبی تصاویر دقیقی از ساختارهای زیر زمین فراهم کند. در صورتی که دیگر روش های مهاجرت در چنین محیط هایی با محدودیت مواجهند. در این مطالعه تأثیر خطای مدل سرعت بر نتایج مهاجرت زمان معکوس بررسی شده است. نتایج مهاجرت زمان معکوس بر مدل های مصنوعی نشان می دهد این روش می تواند حتی با وجود ۲۰ درصد خطا در مدل سرعت، تصویری نسبی از ساختارهای زیر زمین فراهم کند. هر چند وجود خطا در مدل سرعت باعث می شود موقعیت بازتابنده ها در تصویر حاصل با موقعیت واقعی بازتابنده ها اختلاف داشته باشد.

## اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۳/۲۱

تاریخ ارسال به داو: ۹۸/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش داو: ۹۸/۰۴/۰۵

## واژگان کلیدی:

مهاجرت پیش برانبارش عمقی، مهاجرت زمان معکوس، تحلیل سرعت، پدیده های جعلی

## مقدمه

حال حاضر در ایران نیز زمین شناسی پیچیده ای دارند. مناطقی با گسل های رورانده ی شدید ساختارهای نمکی از جمله محیط هایی هستند که باعث می شوند تهیه ی تصویرهای دقیق با استفاده از داده های لرزه ای بسیار چالش برانگیز باشد و بسیاری از روش های تصویرسازی به دلیل شیب زیاد لایه ها و تغییرات شدید سرعت جانبی نتوانند تصویر مناسبی از ساختارها فراهم کنند.

یکی از ابزارهای مؤثر در تهیه ی تصاویر دقیق عمقی از زیر زمین، استفاده از روش های مهاجرت پیش از برانبارش عمقی است. هر چند روش های مهاجرت عمقی نسبت به روش های مهاجرت زمانی حساسیت بیشتری به وجود خطا در مدل سرعت دارند [۱] اما نتایج حاصل از آنها نسبت به روش های مهاجرت زمانی از دقت بیشتری برخوردار بوده و قابل اطمینان تر هستند. یکی از مهم ترین محدودیت های مهاجرت زمانی مکان یابی غیرواقعی<sup>۱</sup> رخدادهای لرزه ای در محیط هایی با تغییرات جانبی سرعت است. حتی اگر از مدل سرعتی دقیقی استفاده شود با افزایش تغییرات جانبی سرعت، عمق و شیب رخداد، این خطا افزایش نیز خواهد یافت [۲]. مطالعات نشان می دهند استفاده از روش های مهاجرت پیش از برانبارش عمقی حتی در محیط هایی که از لحاظ زمین شناسی ساده هستند نیز دقت تصاویر حاصل را افزایش داده و در کاهش خطرپذیری در اکتشاف و حفاری بسیار مؤثر هستند [۳]. با این وجود، همه ی روش های مهاجرت پیش از برانبارش عمقی توانایی یکسانی ندارند و هر کدام از آنها با محدودیت هایی همراه هستند. در این میان روش مهاجرت

در حال حاضر منابع هیدروکربنی یکی از اصلی ترین منابع تأمین انرژی در دنیا به شمار می روند. به همین دلیل اکتشاف و استخراج صیانتی از منابع هیدروکربنی از لحاظ اقتصادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در دهه های گذشته بسیاری از مناطق محتمل که از نظر زمین شناسی در دسترس تر بوده اند پی جویی و اکتشاف شده اند که نتیجه ی آن کشف و بهره برداری از تعداد زیادی میداین بزرگ و فوق عظیم در سال های گذشته است. تاکنون تقریباً اکثر محیط های اکتشافی آسان تر مطالعه و بررسی شده اند و محیط های اکتشافی باقیمانده با چالش ها و دشواری های زمین شناسی بیشتری روبرو هستند. همین امر شرکت های بزرگ نفتی دنیا را به سمت کسب توانایی های فن آورانه ی بیشتر برای غلبه بر چالش های موجود در اکتشاف نفت و گاز در محیط های پیچیده و چالش برانگیز در سرتاسر جهان سوق داده است. از طرف دیگر به دست آوردن مشخصه های مخزنی با استفاده از روش های غیرمستقیم مانند داده های لرزه ای، نه تنها در میداین جدید بلکه در توصیف مجدد بسیاری از میداین قدیمی نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. توصیف دقیق مخازن نفت و گاز مستلزم داشتن تصویر دقیقی از هندسه ی آنها در زیر زمین است. بدون در اختیار داشتن اطلاعات دقیق از هندسه ی و ساختار مخازن نفتی، بسیاری از تخمین ها و توصیف های مخزنی با عدم قطعیت بیشتری همراه خواهند بود. بنابراین به کارگیری روش هایی که توانایی و دقت زیادی در تصویرسازی ساختارهای گوناگون دارند از این منظر نیز ضروری به نظر می رسد. بسیاری از اهداف اکتشافی

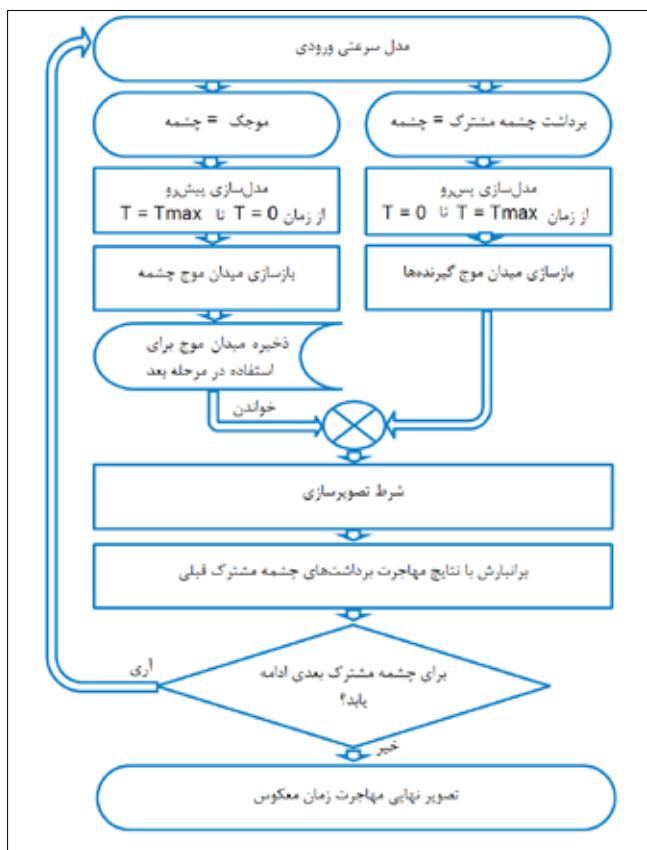
\* نویسنده ی عهده دار مکاتبات (hadimahdavisir@gmail.com)

طیفی و روش‌های جدیدتر تفاضل محدود [۹].  
 ■ تحلیل سرعت و تهیه‌ی مدل سرعتی با استفاده از مهاجرت زمان معکوس [۱۰ و ۱۱].

بسیاری از این کاربردها در سطح جهانی مورد استقبال بسیار خوبی قرار گرفته‌اند. مثلاً برای تهیه‌ی مدل سرعتی توسط مهاجرت زمان معکوس الگوریتم‌های متعددی ارائه شده که می‌توانند مدل سرعتی را با دقت مناسب فراهم کنند. با توجه به اینکه مهاجرت زمان معکوس نسبت به وارون‌سازی موجدیس کامل<sup>۲</sup> حساسیت کمتری به مدل سرعتی اولیه دارد می‌توان از مدل سرعتی حاصل از روش مهاجرت زمان معکوس به‌عنوان مدل اولیه‌ی وارون‌سازی موجدیس کامل استفاده کرد.

## ۲- تئوری مهاجرت زمان معکوس

با وجود توانایی‌های وسیع مهاجرت زمان معکوس، مبنای کلی الگوریتم این روش بسیار ساده است. روش مهاجرت زمان معکوس پیش از برانبارش سه مرحله‌ی اصلی دارد:



شکل ۱ | طرح‌واره‌ی مراحل انجام مهاجرت زمان معکوس پیش از برانبارش

زمان معکوس نسبت به دیگر روش‌های مهاجرت توانایی‌های بیشتری دارد و می‌تواند پیچیده‌ترین محیط‌های زمین‌شناسی را به‌خوبی به تصویر بکشد. روش مهاجرت زمان معکوس از حل کامل معادله‌ی موج (شامل معادله‌ی موج صوتی، کشسان و ...) استفاده می‌کند و به‌همین دلیل در بسیاری از محیط‌ها و ساختارهای پیچیده، الگوریتم تصویرسازی برتر شناخته می‌شود. این روش می‌تواند شیب‌های زیاد، تغییرات جانبی سرعت، امواج برگشتی، رسیده‌های مختلف امواج بازتابی اولیه و غیره را مهاجرت داده و تصویر مناسبی از زیر زمین فراهم آورد [۴]. در حال حاضر روش مهاجرت زمان معکوس به‌عنوان برترین روش تصویرسازی با چالش‌هایی مواجه است که هزینه‌ی محاسباتی فراوان مهم‌ترین چالش و محدودیت این روش محسوب می‌شود. بیشترین هزینه‌های محاسباتی در مهاجرت زمان معکوس مربوط به مدل‌سازی انتشار موج است که هسته‌ی مرکزی الگوریتم این روش را تشکیل می‌دهد. روش‌های زیادی برای کاهش هزینه‌ی محاسبات پیشنهاد شده که استفاده از شرط تصویرسازی بهینه شده از جمله‌ی آنهاست [۵].

## ۱- کاربردهای پیشرفته

روش مهاجرت زمان معکوس از زمان معرفی تا کنون پیشرفت‌های بسیاری داشته است. در ابتدا به‌دلیل حجم بسیار زیاد محاسبات، در این روش فقط از معادله‌ی موج اسکالر دوبعدی استفاده می‌شد. اما در حال حاضر با توجه به پیشرفت‌های فن‌آورانه، در این روش از حالت‌های پیچیده‌تر معادله‌ی موج نیز استفاده می‌گردد. این روش به‌دلیل استفاده از معادله‌ی موج دوطرفه، مزیت‌های دیگری نیز دارد که خلاصه‌ی برخی از آنها به‌شرح زیر است:

انجام مهاجرت زمان معکوس به‌صورت پس از برانبارش یا پیش از برانبارش و به‌صورت دوبعدی یا سه‌بعدی [۶].

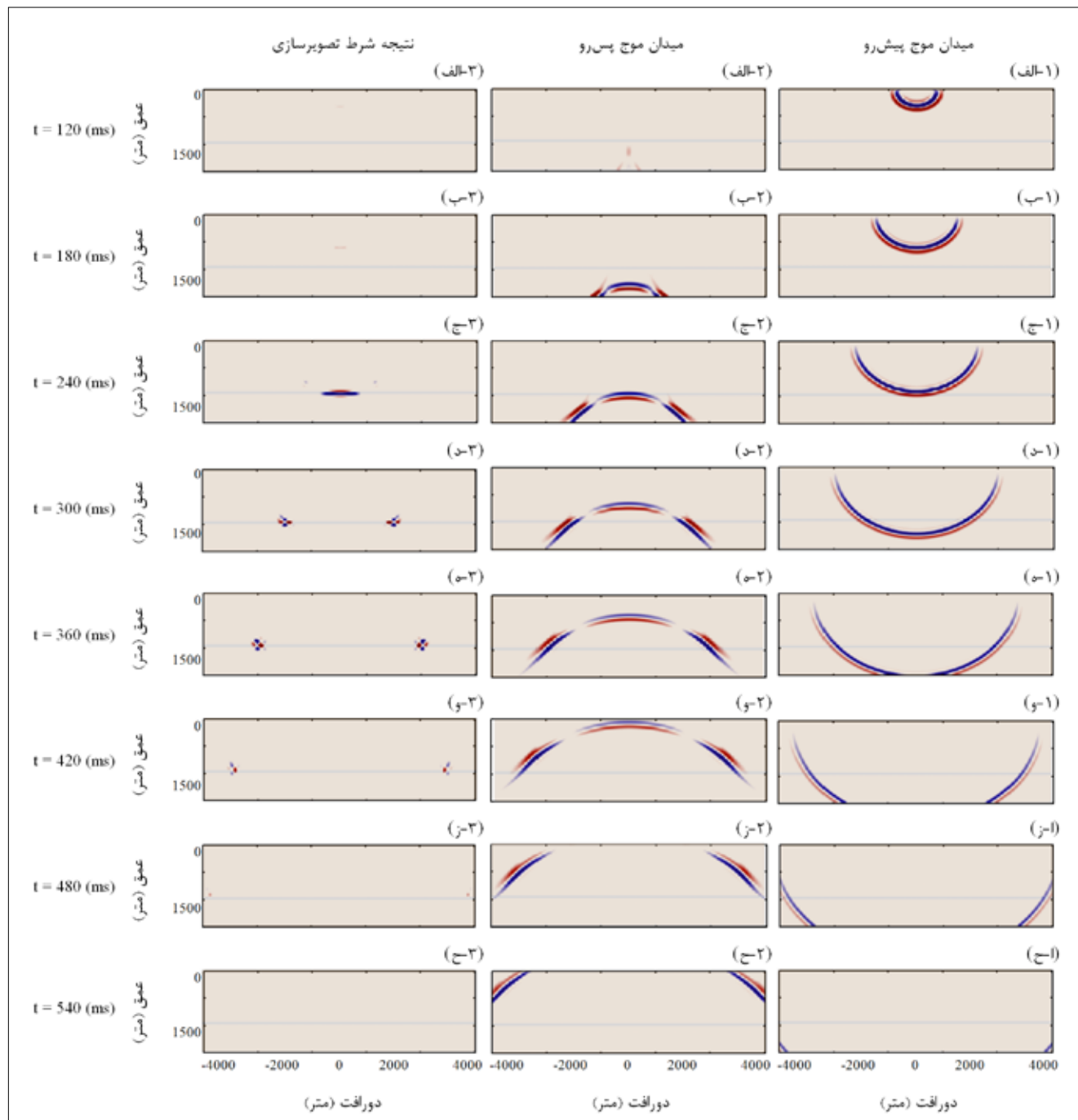
■ در نظر گرفتن هریک از عوامل سرعت موج فشارشی، موج برشی، چگالی و عامل کیفیت (Q factor) در شبیه‌سازی و تصویرسازی با استفاده از معادله‌های موج مربوطه مانند معادله‌ی موج صوتی، کشسان، صوتی گرانرو و کشسان گرانرو<sup>۲</sup> [۷ و ۶].

■ انجام مهاجرت به‌صورت ناهمسانگرد برای انواع محیط‌های ناهمسانگرد مانند VTI، HTI و TTI با استفاده از معادله‌ی موج ناهمسانگرد مربوطه [۸].

■ عدم نیاز به تصحیح استاتیک در صورت لحاظ کردن توپوگرافی در الگوریتم شبیه‌سازی مانند الگوریتم‌های المان محدود، المان

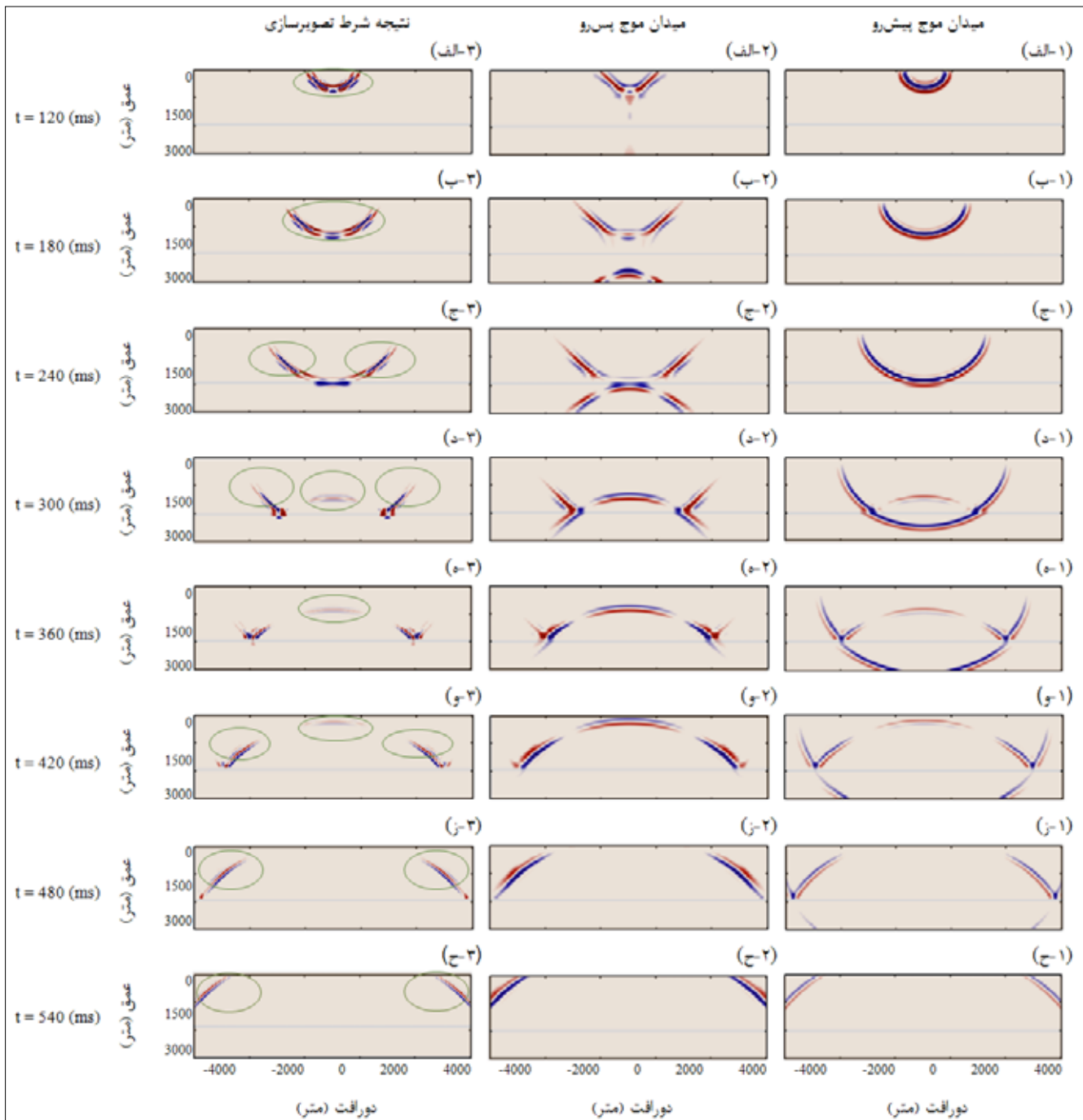
در مهاجرت زمان معکوس، دو میدان موج به‌طور مستقل مدل‌سازی می‌شوند. ابتدا میدان موج چشمه که از محل چشمه شروع شده و از یک تابع موجک به‌عنوان چشمه استفاده می‌گردد. به این میدان موج، میدان موج پایین‌رونده نیز می‌گویند. میدان

■ مدل‌سازی پیش‌رو میدان موج از سمت چشمه  
 ■ مدل‌سازی پس‌رو میدان موج گیرنده‌ها  
 ■ اعمال شرط تصویرسازی جهت به تصویر کشیده‌ی نقاط بازتابنده با استفاده از اطلاعات دو مرحله‌ی بالا



شکل ۲ | چندین مقطع مربوط به سه مرحله‌ی اصلی مهاجرت زمان معکوس با فرض عدم وجود بازتاب. مدل زمین‌شناسی ساده شامل فقط لایه‌ای نازک در پشت زمینه‌ی شکل‌ها نشان داده شده است. موقعیت چشمه در وسط سطح آزاد قرار دارد. ستون‌های اول تا سوم به‌ترتیب نتایج مدل‌سازی پیش‌رو چشمه، مدل‌سازی پس‌رو میدان موج گیرنده‌ها و شرط تصویرسازی را نشان می‌دهند. ردیف‌های (الف) تا (ح) نیز به‌ترتیب مربوط به گام‌های زمانی ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰، ۴۲۰ و ۴۸۰ میلی‌ثانیه هستند.

موج چشمه به صورت مستقیم و پیش‌رو مدل‌سازی می‌شود. میدان موج مدل‌سازی شده برای هر گام زمانی ذخیره می‌گردد تا در مرحله‌ی سوم استفاده شود. در مرحله‌ی بعد میدان موج گیرنده‌ها مدل‌سازی می‌گردد. در این مرحله داده‌های چشمه‌ی مشترک ثبت‌شده به صورت معکوس به عنوان چشمه‌های فرضی در نظر گرفته شده و در مدل منتشر می‌گردد. به این میدان موج



۳ | چندین مقطع مربوط به سه مرحله‌ی اصلی مهاجرت زمان معکوس بدون فرض عدم وجود بازتاب. مدل زمین‌شناسی ساده شامل فقط لایه‌ای نازک در پشت زمین‌ی شکل‌ها نشان داده شده است. موقعیت چشمه در وسط سطح آزاد قرار دارد. ستون‌های اول تا سوم به ترتیب نتایج مدل‌سازی پیش‌رو چشمه، مدل‌سازی پس‌رو میدان موج گیرنده‌ها و شرط تصویرسازی را نشان می‌دهند. ردیف‌های (الف) تا (ح) نیز به ترتیب مربوط به گام‌های زمانی ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰، ۴۲۰، ۴۸۰ و ۵۴۰ میلی‌ثانیه هستند. پدیده‌های جعلی مهاجرت زمان معکوس با رنگ سبز نشان داده شده است.



برای هر برداشت چشمه‌ی مشترک حجم محاسباتی بسیاری دارد. از طرف دیگر ذخیره‌سازی صفحه‌ی مدل در عملیات دوبعدی یا مکعب مدل در عملیات سه‌بعدی برای هر گام زمانی نیازمند حافظه بسیار زیادی است. روش‌های مختلفی برای کاهش حجم محاسبات و نیز کاهش حافظه‌ی مورد نیاز برای ذخیره‌ی اطلاعات معرفی شده‌اند.

### ۳- پدیده‌های جعلی در مهاجرت زمان معکوس

یکی از مشکلات مهاجرت زمان معکوس، ایجاد یک‌سری پدیده‌های جعلی همراه با آنست. این پدیده‌های جعلی بر اثر وجود بازتاب‌ها در مدل ایجاد می‌شوند. وجود بازتاب‌ها باعث انطباق میدان موج گیرنده‌ها (که به‌صورت پسررو مدلسازی می‌شوند) با میدان موج بازتاب‌ها (که به‌صورت پیش‌رو مدلسازی می‌شوند) بر یکدیگر و ظاهر شدن نتیجه‌ی شرط تصویرسازی آنها به‌صورت پدیده‌های جعلی می‌گردد. این پدیده‌های جعلی دامنه‌ی بسیار زیاد و محتوای فرکانسی بسیار کمی دارند و می‌توانند تصاویر ایجاد شده را به‌طور کامل بیوشانند. روش‌های مختلفی برای کاهش اثر پدیده‌های جعلی ایجادشده پیشنهاد گردیده که تفکیک میدان موج بر اساس جهت انتشار با استفاده از روش‌هایی مانند بردار پوئین‌تینگ<sup>۵</sup>، استفاده از فیلتر بالاگذر<sup>۶</sup>، فیلتر لاپلاسی<sup>۷</sup> و نیز هموار کردن مدل سرعتی از جمله‌ی آنهاست [۱۲]. مراحل مختلف مهاجرت زمان معکوس و نحوه‌ی ایجاد پدیده‌های جعلی در شکل‌های ۳ و ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها از یک مدل سرعتی ساده شامل لایه‌ی نازک درون آن به‌ضخامت ۲۰ متر (برابر با یک نمونه در مدل گسسته) استفاده شده است. در این شکل‌ها ستون‌های اول تا سوم به‌ترتیب نتایج مدل‌سازی پیش‌رو، مدل‌سازی پسررو و شرط تصویرسازی را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهند. در شکل ۲- فرض شده لایه‌ها هیچ بازتابی در مدل

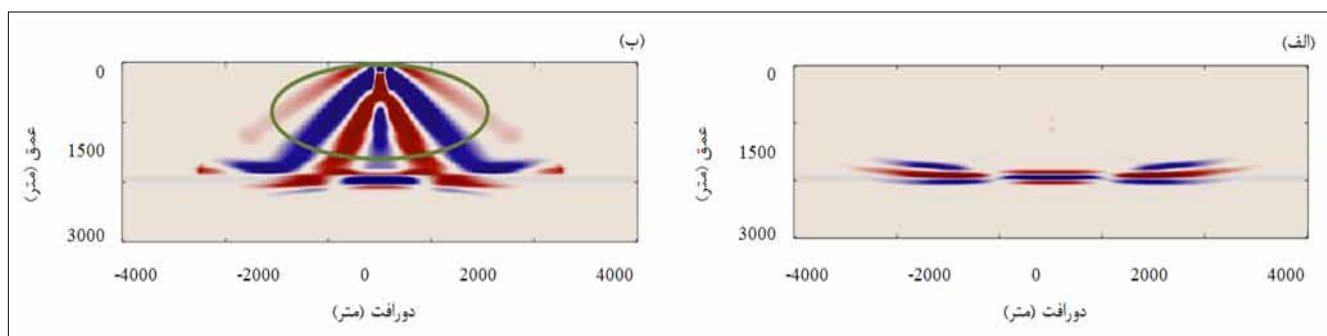
میدان موج بالارونده نیز می‌گویند؛ چراکه امواج بازتابیده‌شده‌ی بالارونده را مدل‌سازی می‌کند. میدان موج گیرنده‌ها به‌صورت معکوس و پسررو مدل‌سازی می‌شود. یعنی مدل‌سازی از بیشترین زمان شروع شده و زمان‌های قبل‌تر برون‌یابی می‌گردند. علت نام‌گذاری این روش به مهاجرت زمان معکوس نیز همین است. توسط مدل‌سازی میدان موج گیرنده، تاریخچه‌ی میدان موج در کل مدل شبیه‌سازی می‌شود. در سومین مرحله توسط یک شرط تصویرسازی و با استفاده از میدان موج چشمه و گیرنده در زمان‌های متناظر، نقاط بازتاب به تصویر کشیده می‌شوند.

شرط‌های تصویرسازی مختلفی برای به تصویر کشیدن نقاط بازتاب‌کننده ارائه شده که برخی از آنها از نظر ریاضی شباهت زیادی به یکدیگر دارند. یکی از روش‌های مرسوم برای شرط تصویرسازی، استفاده از همبستگی متقابل با تأخیر صفر<sup>۴</sup> میادینی موج پیش‌رو و پسررو برای هر نقطه است که این کار با استفاده از

$$I(\bar{x}) = \int_0^{T_{max}} s(t, \bar{x}) r(t, \bar{x}) dt. \quad (1)$$

که  $s$ ،  $I$  و  $r$  به‌ترتیب تصویر ساخته شده، میدان موج چشمه و میدان موج گیرنده هستند. در این شرط تصویرسازی، در هر گام زمانی، نتایج مدل‌سازی پیش‌رو و پسررو در هم ضرب می‌شوند و سپس نتایج همه گام‌های زمانی با هم جمع می‌گردند. با این کار مقطع مربوط به یک برداشت چشمه‌ی مشترک ساخته می‌شود. برای تمام برداشت‌های چشمه‌ی مشترک این عملیات تکرار شده و سپس برای هر نقطه از مدل، جواب‌های مربوط به برداشت‌های چشمه‌ی مشترک مختلف دوباره با یکدیگر جمع می‌گردند که به مرحله‌ی آخر برانبارش گفته می‌شود.

شکل ۱- طرح‌واره‌ی مراحل انجام مهاجرت زمان معکوس را نشان می‌دهد. این طرح‌واره دلیل نیاز مهاجرت زمان معکوس به حجم محاسبات و حافظه زیاد را نشان می‌دهد. مدل‌سازی انتشار موج

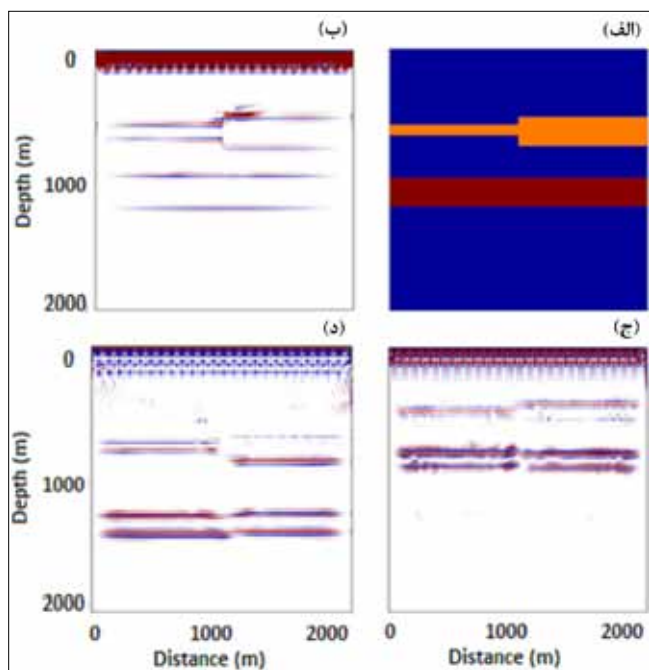


۴ | نتایج مهاجرت زمان معکوس (الف) متناظر با شکل ۲- (ب) متناظر با شکل ۳- پدیده‌های جعلی مهاجرت زمان معکوس با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. این تصاویر با برانبارش نتایج شرط تصویرسازی در زمان‌های مختلف متناظر با ستون سوم شکل‌های ۲ و ۳ به‌دست آمده‌اند.

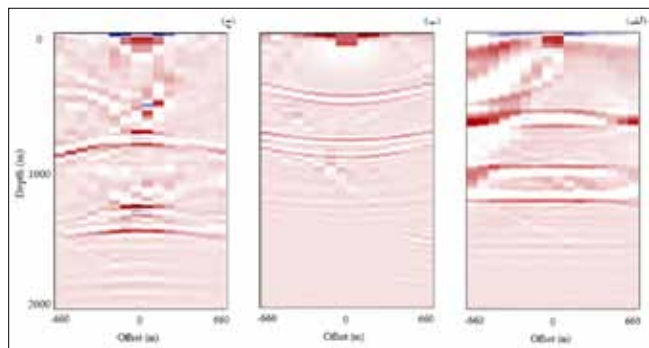


و برداشت تصویر مشترک آن، دیگر پدیده‌ای مسطح نخواهد بود. به همین دلیل می‌توان از برداشت تصویر مشترک برای ارزیابی و به‌روزرسانی مدل سرعت استفاده کرد.

شکل ۶- برداشت تصویر مشترک مربوط به چشمه‌ای با فاصله‌ی ۶۶۰ متری از سمت چپ مدل را برای مدل هر سه مدل سرعتی نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است در برداشت تصویر مشترک، بازتابنده برای مدل دقیق مسطح است اما برای مدل‌های ۸۰ و ۱۲۰٪ مسطح نیست و با افزایش دورافت،



شکل ۵ | یک مدل ساده‌ی زمین‌شناسی برای بررسی اثر سرعت در مهاجرت زمان معکوس (الف) مقطع مهاجرت یافته به روش مهاجرت زمان معکوس با استفاده از مدل سرعتی دقیق (ب) با استفاده از مدل سرعتی ۸۰٪، با استفاده از مدل سرعتی ۱۲۰٪



شکل ۶ | برداشت تصویر مشترک مربوط به فاصله‌ی ۶۶۰ متری از سمت چپ مدل مربوط به (الف) مدل سرعتی دقیق (ب) مدل سرعتی ۸۰٪ (ج) مدل سرعتی ۱۲۰٪

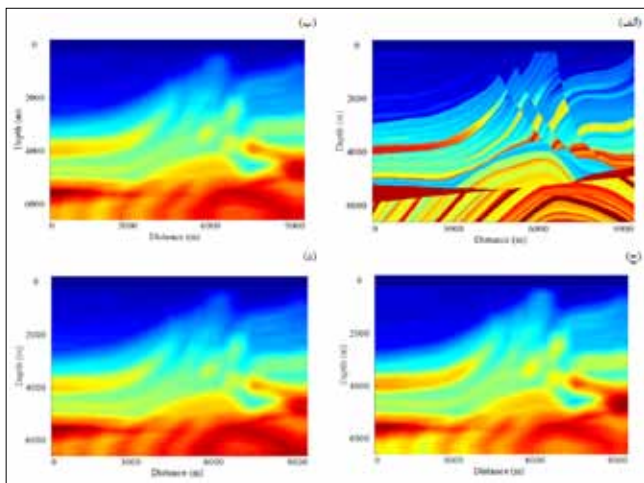
ایجاد نمی‌کنند. با توجه به لحاظ کردن فرض عدم وجود بازتاب، انتظار می‌رود هیچ پدیده‌ی جعلی نیز به وجود نیاید. کاملاً واضح است که این فرض در واقعیت وجود ندارد و فقط برای بررسی نحوه‌ی ایجاد پدیده‌های جعلی در نظر گرفته شده است. شکل ۳- مراحل مهاجرت زمان معکوس را بدون در نظر گرفتن این فرض نشان می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود پدیده‌های جعلی در نتیجه‌ی مهاجرت زمان معکوس ایجاد گردند.

#### ۴- حساسیت به مدل سرعتی

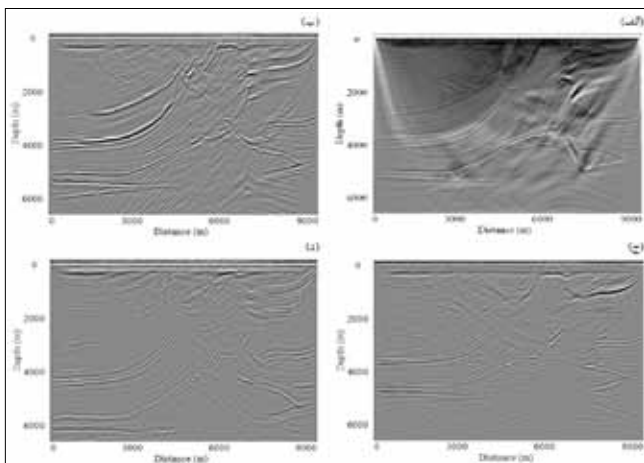
روش‌های مهاجرت نسبت به مدل سرعتی مورد استفاده در آنها حساسیت ویژه‌ای دارند و اگر از مدل سرعتی مناسبی استفاده نشود نمی‌توانند تصاویر دقیق و صحیحی فراهم کنند. روش‌های مهاجرت عمقی پیش از برانبارش نیز از این قاعده مستثنی نبوده و به مدل سرعتی بسیار حساس هستند. برای بررسی مقدار حساسیت روش مهاجرت زمان معکوس و درک بهتر اثر سرعت بر موقعیت بازتابنده‌ها، از مدلی مصنوعی و ساده استفاده شده است. شکل ۵- الف مدل زمین‌شناسی مورد استفاده و شکل ۵- ب نتیجه‌ی مهاجرت زمان معکوس آن با استفاده از مدل سرعتی دقیق را نشان می‌دهند. برای بررسی اثر سرعت، مهاجرت زمان معکوس با دو مدل سرعتی به ترتیب با ۸۰ و ۱۲۰٪ سرعت مدل دقیق تکرار شد که نتایج آن به ترتیب در شکل‌های ۵- ج و د نشان داده شده است. با مقایسه‌ی مقاطع حاصل و مدل زمین‌شناسی به خوبی مشخص است که مدل سرعتی ۸۰٪ بازتابنده‌ها را بالاتر از موقعیت واقعی آنها و مدل سرعتی ۱۲۰٪ بازتابنده‌ها را پایین‌تر از موقعیت واقعی آنها به تصویر کشیده است.

یکی از ابزارهای مهم برای صحت‌سنجی مدل سرعتی، تحلیل برداشت تصویر مشترک حاصل از مهاجرت عمقی پیش از برانبارش است. اگر از مدل سرعتی دقیقی در مهاجرت استفاده شده باشد نقطه‌ی بازتاب خاصی در تمام مقاطع مهاجرت داده شده‌ی مربوط به برداشت‌های چشمه‌ی مشترک مختلف دقیقاً در یک موقعیت به تصویر کشیده می‌شود. بنابراین اگر تصاویر یک بازتابنده در مقاطع مختلف کنار یکدیگر قرار داده شود که به آن برداشت تصویر مشترک<sup>۱</sup> گفته می‌شود بازتابنده به صورت پدیده‌ی خطی مسطح دیده می‌شود که با برانبارش آنها یک بازتاب با نسبت سیگنال به نوفه‌ی قوی ایجاد خواهد شد. اگر از مدل سرعتی مناسبی در مهاجرت استفاده نشود نقطه‌ی بازتاب خاصی در مقاطع مهاجرت داده شده‌ی مختلف در موقعیت‌های مختلفی قرار خواهد گرفت

که در داده‌های واقعی معمولاً سرعت لایه‌های کم عمق‌تر با دقت بیشتری تعیین می‌شود. به همین دلیل برای ساخت این مدل‌ها در قسمت‌های کم عمق از سرعت دقیق هموار شده استفاده گردیده و به سمت پایین مدل، اختلاف سرعت به صورت تدریجی و یکنواخت افزایش یافته است. شکل ۸- نتایج مهاجرت زمان معکوس متناظر با مدل‌های یافته شکل ۷- را نشان می‌دهد. برای تمامی مقاطع مهاجرت داده شده در این شکل از فیلتر لاپلاسین برای حذف پدیده‌های جعلی استفاده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج مدل سرعت هموار شده در بسیاری نقاط بسیار به نتایج مدل دقیق نزدیک است و فقط در قسمت توده‌ی نمکی (قسمت پایین مدل



شکل ۷ | مدل سرعت مارموزی [۱۴] (الف) مدل دقیق (ب) مدل هموار شده (ج) مدل هموار شده که در آن سرعت به صورت تدریجی و یکنواخت از بالا به پایین از صفر تا ۲۰٪ کاهش یافته است (د) مدل هموار شده که در آن سرعت به صورت تدریجی و یکنواخت از بالا به پایین از صفر تا ۲۰٪ افزایش یافته است



شکل ۸ | مقطع مهاجرت یافته به روش مهاجرت زمان معکوس متناظر با مدل‌های شکل ۷-

به ترتیب به صورت مقعر و محدب درآمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شکل مقعرگونه‌ی بازتابنده در برداشت تصویر مشترک نشان‌دهنده‌ی سرعت کمتر از سرعت واقعی است و شکل محدب‌گونه‌ی آن نشان‌دهنده‌ی سرعت بیشتر از سرعت واقعی است. از این ویژگی می‌توان در ارزیابی دقت مدل سرعتی و نیز به‌روزرسانی آن استفاده کرد. نکته‌ی قابل توجه اینکه با وجود اختلاف زیاد از سرعت واقعی، همچنان مهاجرت زمان معکوس توانسته تصاویر نسبتاً خوبی از زیر زمین فراهم کند و این امر زمینه را برای بهبود مدل سرعتی و تصویر حاصل از آن فراهم می‌کند.

ورداشت‌های تصویر مشترک را می‌توان در حیطه‌ی دورافت<sup>۹</sup> یا در حیطه‌ی زاویه<sup>۱۰</sup> به‌دست آورد. در حیطه‌ی دورافت، ورداشت‌های تصویر مشترک از نوعی پدیده‌های جعلی متأثر می‌شوند و از کیفیت آنها کاهش می‌یابد؛ در صورتی که در برداشت‌های تصویر مشترک حیطه‌ی زاویه‌ی این پدیده‌های جعلی بسیار کم است که نشان‌دهنده‌ی مزیت برداشت‌های تصویر مشترک حیطه‌ی زاویه است [۱۳]. محققان نشان دادند که برای محیط‌های پیچیده، برداشت‌های تصویر مشترک حیطه‌ی دورافت حتی برای مدل سرعتی دقیق، تحت تأثیر پدیده‌های جعلی قرار گرفته و دیگر پدیده‌ی مسطحی نخواهد بود [۱۳]. باید توجه داشت پدیده‌های جعلی ذکر شده، متفاوت از پدیده‌های جعلی روش مهاجرت زمان معکوس هستند و در روش‌های دیگر مانند کرشهف نیز بوجود می‌آیند. یکی از دلایل ایجاد این پدیده‌های جعلی وجود امواج چندمسیره<sup>۱۱</sup> است. با این وجود معمولاً اثر این پدیده‌های جعلی در نتیجه‌ی برنابارش داده‌ها کم شده و مقاطع برنابارش برداشت‌های تصویر مشترک از کیفیت قابل قبولی برخوردار خواهند بود [۱۳]. اثر سرعت در مدل‌های پیچیده‌تر نیز با استفاده از مدل مارموزی<sup>۱۲</sup> شکل ۷-الف که مدلی پیچیده است بررسی شده است، در این مطالعه، اثر هموار شدگی مدل سرعت، کاهش مقدار مدل سرعت و افزایش مقدار سرعت در مهاجرت زمان معکوس در نظر گرفته شده که مدل‌های متناظر با آنها در شکل ۷- نشان داده شده است. در این شکل مدل (ب) مدل مارموزی هموار شده است. مدل (ج) متناظر با مدل هموار شده است که در آن سرعت به صورت تدریجی و یکنواخت از بالا به پایین از صفر تا ۲۰٪ کاهش یافته است و مدل (د) نیز متناظر با مدل هموار شده است که در آن سرعت به صورت تدریجی و یکنواخت از بالا به پایین از صفر تا ۲۰٪ افزایش یافته است. کاهش یا افزایش تدریجی مقادیر سرعت به دلیل آنست

نتیجه بازتابنده‌ها در موقعیت‌های واقعی خود تصویر نخواهند شد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه توانایی روش مهاجرت زمان معکوس برای به تصویر کشیدن محیط‌هایی با تغییرات شدید سرعت جانبی، شیب ساختارهای زیاد و اثر مدل سرعت بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که روش مهاجرت زمان معکوس در صورت استفاده از مدل سرعتی مناسب می‌تواند به خوبی چنین محیط‌های پیچیده‌ای را به تصویر بکشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد این روش قادر است حتی با وجود ۲۰٪ خطا در مدل سرعتی، باز هم تصویری نسبی از موقعیت بازتابنده‌ها فراهم کند. هرچند با افزایش خطا در مدل سرعت، موقعیت بازتابنده‌ها از موقعیت واقعی دورتر می‌شود. اما با ایجاد تصویر اولیه از ساختارها در کنار ارزیابی ورداشتهای تصویر مشترک، امکان تصحیح بهتر مدل سرعت با روش‌های مختلف فراهم می‌گردد. ■

در وسط) توانسته لایه‌ها را به خوبی به تصویر بکشد. در این محدوده اختلاف سرعت مدل هموار شده و مدل دقیق به ۳۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین با مقایسه شکل‌ها مشاهده می‌گردد که در مهاجرت با سرعت‌های کمتر از سرعت واقعی، پدیده‌ها بالاتر از موقعیت واقعی آنها دیده می‌شوند. برای سرعت‌های بیشتر از سرعت واقعی نیز پدیده‌ها پایین‌تر از سرعت واقعی تصویر شده‌اند. باید توجه داشت که در این مدل‌ها اختلاف سرعت با مدل واقعی به ترتیب به ۱۰۰۰ و ۶۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد که مقدار قابل توجهی است. با این وجود مهاجرت زمان معکوس توانسته تصویری نسبی از ساختار و موقعیت لایه‌ها نسبت به یکدیگر فراهم کند که می‌تواند در تصحیح مدل سرعت به روش‌های مختلف بسیار مؤثر و مفید باشد. نکته‌ی قابل ملاحظه دیگر اینست که در مهاجرت زمان معکوس، اختلاف سرعت در یک قسمت از مدل بر نتایج قسمت‌های پایین‌تر یا قسمت‌های مجاور خود نیز اثر می‌گذارد. زیرا اختلاف سرعت، زمان سیر جبهه‌ی موج را متأثر کرده و در

### پانویس‌ها

1. Misposition
2. Viscoelastic
3. Full waveform inversion; FWI
4. Zero-lag cross correlation
5. Poynting vector
6. High-pass
7. Laplacian
8. Common image gather; CIG
9. Offset domain common image gather; ODCIG
10. Angle domain common image gather; ADCIG
11. Multi-pathing waves
12. Marmousi model

### منابع

- [1] Gray, S. H., Etgen, J., Dellinger, J., and Whitmore, D., Seismic migration problems and solutions: Geophysics, 66, pp. 1622-2001, 1640.
- [2] Jiang, Z., Elastic wave modelling and reverse-time migration by a staggered-grid finite-difference method: PhD thesis, University of Calgary, 2012.
- [3] Brown, M. P., Higginbotham, J. H., Macesanu, C. M., Ramirez, O. E., List, D., and Lang, C., PSDM for unconventional reservoirs? A Niobrara Shale case study: SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 12012, 5-.
- [4] Farmer, P. A., Zhou, Z. Z., and Jones, D., The role of reverse time migration in imaging and model estimation: The Leading Edge, 28, pp. 4362009, 441-.
- [5] Basir, H.M., Javaherian, A., Shomali, Z. H., Firouz-Abadi, R.D. and Gholamy, S.A., Modified imaging condition for reverse time migration based on reduction of modelling time. Exploration Geophysics, 49, pp. 4942018, 505-.
- [6] Liu, H., Li, B., Liu, H., Tong, X., Liu, Q., Wang, X., and Liu, W., The issues of prestack reverse time migration and solutions with graphic processing unit implementation: Geophysical Prospecting, 60, pp. 9062012, 918-.
- [7] Zhu, T., Harris, J. M., and Biondi, B., Q-compensated reverse-time migration: Geophysics, 79, pp. S77-S87, 2014.
- [8] Huang, T., Zhang, Y., Zhang, H., and Young, J., Subsalt imaging using TTI reverse time migration: The Leading Edge, 28, pp. 4482009, 452-.
- [9] Liu, Q., Zhang, J., and Gao, H., Reversetime migration from rugged topography using irregular, unstructured mesh: Geophysical Prospecting, 65, pp. 4532017, 466-.
- [10] Weibull, W. W., and Arntsen, B., Automatic velocity analysis with reverse-time migration: Geophysics, 78, pp. S179-S192, 2013.
- [11] Weibull, W. W., and Arntsen, B., Anisotropic migration velocity analysis using reverse-time migration: Geophysics, 79, pp. R13-R25, 2014.
- [12] Zhang, Y., and Sun, J., Practical issues in reverse time migration: true amplitude gathers, noise removal and harmonic source encoding: First Break, 27, pp. 532009, 59-.
- [13] Xu, S., Chauris, H., Lambare, G., and Noble, M. S., Common-angle migration: A strategy for imaging complex media: Geophysics, 66, pp. 1877-1894, 2001.
- [14] Brougois, A., Bourget, M., Lailly, P., Poulet, M., Ricarte, P., and Versteeg, R., Marmousi, model and data: EAEG Workshop-Practical