

کاهش بازتاب‌های مصنوعی در مدل‌سازی عددی داده‌های عملیات لرزه‌نگاری

مجتبی خسروی*، نوید امینی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران • محمدعلی طالبی، مدیریت اکتشاف • امین رحیمی دلخانی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر |

چکیده

تفسیر دقیق داده‌های لرزه‌نگاری به منظور اکتشاف ذخایر هیدروکربنی و همچنین، طراحی عملیات برداشت داده‌های لرزه‌نگاری همواره یکی از اساسی‌ترین چالش‌های پیش‌رو در اکتشاف نفت و گاز بوده است. مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی لرزه‌نگاشت‌ها یکی از ابزارهای مهم محققان و کارشناسان در تفسیر کمی و کیفی داده‌های لرزه‌نگاری محسوب می‌شود. از آن جهت که با کمک لرزه‌نگاشت مصنوعی و مقایسه یک لرزه‌نگاشت مصنوعی با لرزه‌نگاشت واقعی تفسیر بهتر و دقیق‌تری از مخازن نفتی نهفته در زمین به عمل می‌آید، لذا تولید یک لرزه‌نگاشت مصنوعی بسیار دقیق و مناسب یکی از مباحث مهم مدل‌سازی است. در مدل‌سازی عددی، به علت محدودیت حافظه‌ی رایانه نمی‌توان ابعاد مدل را بی‌نهایت در نظر گرفت و به ناچار باید ابعاد مدل را محدود کرد. این محدود کردن، موجب ایجاد بازتاب‌های ناخواسته در مدل می‌شود. به منظور تضعیف این بازتاب‌ها روش‌های بسیاری معرفی شده که پرکاربردترین آنها، روش لایه جاذب کاملاً جور شده^۱ (PML) است، که عموماً محققان در پی بهبود این روش می‌باشند. در این مقاله با معرفی الگوریتم جدیدی با ترکیب روش PML و روش مرز جاذب^۲ (ABC) علاوه بر اینکه تضعیف بازتاب‌ها بهتر صورت گرفته، زمان و حجم محاسبات نیز کاهش یافته است. از طرفی، نتایج این روش با نتایج مدل‌سازی حاصل از نرم‌افزار صنعتی OMNI* مقایسه شده و نشان داده شده که روش معرفی شده با حجم محاسبات بسیار کمتر نسبت به این نرم‌افزار، نتایج مطلوبی از مدل‌سازی ارائه می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۴/۱۰/۱۷
تاریخ ارسال به داور: ۹۴/۱۰/۲۳
تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۹/۱۱

واژگان کلیدی:

مدل‌سازی عددی، معادله موج، مرز جاذب (ABC)، لایه جاذب کاملاً جور شده (PML)، نرم‌افزار OMNI*.

مقدمه

در این مقاله ابتدا نقش و اهمیت مدل‌سازی انتشار امواج لرزه‌ای در لرزه‌نگاری اکتشاف نفت بیان می‌شود، سپس اثرات بازتاب‌های مرزی در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار صنعتی OMNI* بررسی می‌گردد. در نهایت، روشی برای کاهش بازتاب‌های مصنوعی و بهبود مدل‌سازی ارائه می‌شود و در مثال‌های عددی نتایج آن ارائه می‌شود.

۱- کاربرد مدل‌سازی انتشار امواج لرزه‌ای در لرزه‌نگاری اکتشافی نفت

مدل‌سازی لرزه‌ای ریسک عملیات لرزه‌نگاری را با مهیا کردن اطلاعات کمی برای طراحی مناسب‌تر عملیات کاهش می‌دهد. در مناطق با زمین‌شناسی پیچیده می‌توان با استفاده از این روش پارامترهای مختلف برداشت را به ازای مدل‌های مختلف تحت‌الارضی آزمایش کرد و به یک راهبرد بهینه برای جمع‌آوری و برداشت داده‌ها رسید [۵]. تصویربرداری از گنبد‌های نمکی تحت‌الارضی تا سال‌ها به عنوان یک چالش در لرزه‌نگاری اکتشافی مطرح بود. مدل‌سازی لرزه‌ای به صورت قابل توجهی طراحی عملیات در این مناطق را بهبود داده است [۶].

مدل‌سازی لرزه‌ای در مطالعات ژئوفیزیکی کاربردهای گسترده‌ای دارد. مدل‌سازی لرزه‌ای نقش بسیار مهمی در تصویرسازی و تفسیر داده‌های لرزه‌ای، شناسایی خصوصیات مخزنی و همچنین طراحی عملیات لرزه‌نگاری به منظور اکتشاف ذخایر هیدروکربنی ایفا می‌کند. مدل‌سازی عددی نیازمند حل معادلات موج است. در این مقاله برای حل معادله موج آکوستیک از روش تفاضل متناهی استفاده شده است. به علت محدود کردن مدل به یک محدوده خاص، در کرانه‌های مدل، بازتاب‌های مصنوعی ایجاد شده که مدل را مخدوش می‌کند. اساساً وجود این بازتاب‌های مصنوعی، یکی از بزرگترین چالش‌های پیش‌رو در مباحث مدل‌سازی عددی است که از دیرباز محققان بسیاری به منظور تضعیف این بازتاب‌ها به معرفی روش‌های گوناگونی پرداخته‌اند [۱-۴] که در میان این روش‌ها، روش کلیتون انکوئست (ABC) و روش برنگر (PML) عملکرد مطلوبی داشته‌اند. روش ABC بسیار ساده بوده و حجم محاسبات بسیار کمی دارد؛ ولی پرتوهایی که عمود بر مرز برخورد نمی‌کنند را به خوبی تضعیف نمی‌کند. از طرف دیگر، روش PML عملکرد خوبی دارد و به زاویه برخورد پرتو به مرز حساس نیست؛ ولی حجم و هزینه محاسباتی را بسیار افزایش می‌دهد.

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (M_khosravi@ut.ac.ir)

در شکل ۱- نحوه ایجاد این بازتاب‌ها در یک محیط همگن با سرعت ۲۰۰۰ متر بر ثانیه نمایش داده شده است. ابعاد مدل ۲۰۰ گره در ۲۰۰ گره (معادل ۲۰۰ متر در ۲۰۰ متر) بوده و مدل‌سازی در مدت زمان ۰/۵ ثانیه صورت گرفته است. منظور از گره، نقاط محاسباتی و گسسته‌سازی مکانی در روش تفاضل متناهی محدود است که معیار انتخاب فاصله گره‌ها؛ پایداری جواب و کیفیت پاسخ‌ها می‌باشد. برای رسیدن به پاسخ مناسب، دقت کافی و پایداری جواب، فاصله گره‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$dx \leq \frac{\lambda}{8} \equiv \frac{v}{f} \quad (1)$$

که در اینجا λ کوچک‌ترین طول موج منتشرشده در مدل، v حداقل سرعت مدل و f ماکزیمم فرکانس منتشرشده در مدل می‌باشد. چشمه ایجادکننده موج، از نوع ریکر با فرکانس مرکزی ۳۰ هرتز می‌باشد. محل چشمه مرکز مدل می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۱- پیداست، زمانی که موج به دیواره‌های مدل برخورد می‌کند بازتاب‌های کرانه‌ای در مدل ایجاد شده است.

۳- کاهش بازتاب‌های مصنوعی در مدل‌سازی عددی

روش ABC و PML مهم‌ترین روش‌های کاهش بازتاب‌های مصنوعی در مدل‌سازی عددی انتشار موج در زمین هستند. روش ABC از تقریب معادله موج یک‌طرفه در مرزهای مدل استفاده می‌کند [۱]. در روش PML می‌توان یک لایه جاذب مصنوعی به گونه‌ای تعریف نمود که هیچ بازتابی از مرز بین محیط آزاد و محیط جاذب ایجاد نشود؛ در واقع با قراردادن یک پارامتر قوی میراگر در درون لایه جاذب به نحو مطلوبی دامنه امواج بازتابی کاهش می‌یابد [۳].

شکل معادله موج در حوزه فرکانس که با روش تفاضل متناهی مرتبه اول گسسته شده، به صورت زیر است [۱۰]:

$$\frac{\omega^2}{c^2} P_{ij} + \left[\frac{P_{i-1,j} - 2P_{i,j} + P_{i+1,j}}{\Delta x^2} \right] \quad (2)$$

$$+ \left[\frac{P_{i,j-1} - 2P_{i,j} + P_{i,j+1}}{\Delta z^2} \right] = -S_{ij},$$

که در این رابطه ω فرکانس زاویه‌ای، c سرعت انتشار موج در محیط، P فشار، S چشمه و Δx و Δz فاصله بین گره‌ها در راستای محورهای x و z است. با لحاظ شرایط مرزی PML، شکل معادله موج به صورت زیر می‌شود [۱۱]:

$$P_{i,j} = \frac{C^2(i,j)}{B_x(i,j,\omega)} \left[\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\partial x^2} \right] + \quad (3)$$

$$\frac{C^2(i,j)}{B_z(i,j,\omega)} \left[\frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\partial z^2} \right],$$

با استفاده از مدل‌سازی لرزه‌ای می‌توان الگوریتم‌های مختلف پردازش داده را آزمایش و بهترین مورد را انتخاب نمود. یک نقش اساسی این کار، کالیبره کردن نتایج روش‌های مهاجرت داده‌های لرزه‌ای است [۷]. این تکنیک می‌تواند برای بهینه کردن مراحل پردازش به ویژه در شرایط و موقعیت‌های پیچیده استفاده شود. به دلیل نقش مهم و اساسی مدل‌سازی لرزه‌ای در پردازش داده‌های لرزه‌ای، مدل‌های مصنوعی بسیاری تولید شده و به طور گسترده‌ای در پردازش داده‌های لرزه‌ای به کار می‌رود. روش‌های پردازشی متعددی از جمله حذف چندگانه‌ها، تخمین سرعت، مهاجرت و وارون‌سازی لرزه‌ای با استفاده از مدل مصنوعی مارموسی^۳ بررسی شده است. مدل‌های سه‌بعدی گنبد نمکی روراند^۴ SEG/EAGE و داده‌های مصنوعی همراه آن برای بررسی روش‌های تخمین سرعت مهاجرت و روش‌های تصویربرداری لرزه‌ای استفاده شده است [۵-۶]. مدل‌سازی لرزه‌ای را می‌توان برای برقراری ارتباط و مقایسه بین پاسخ لرزه‌ای یک مدل تفسیر شده و داده‌های لرزه‌ای واقعی استفاده نمود. یک کاربرد دیگر، توسعه مدل‌های زمین‌شناسی برای بررسی مشکلات ساختمانی و چینه‌شناسی به وجود آمده در مرحله تفسیر است [۷]. همچنین می‌توان از مدل‌سازی لرزه‌ای برای بررسی اعتبار و صحت تفسیرهای انجام‌شده بر روی داده‌های لرزه‌ای مخصوصاً در شرایط و محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی استفاده نمود. کیفیت داده‌های لرزه‌ای به دست آمده در این شرایط غالباً بسیار ضعیف است به گونه‌ای که نمی‌توان به ساختارهای تفسیر شده در این شرایط اعتماد کرد [۶]. با استفاده از مدل‌سازی لرزه‌ای می‌توان مدل‌های مربوط به ساختارهای مختلف را با داده واقعی مقایسه کرد و بهترین مدل که دارای بیشترین انطباق است را انتخاب نمود [۹]. همچنین یکی از کاربردهای مهم مدل‌سازی در مسائل Full Waveform Inversion (FWI) می‌باشد. در واقع هسته اصلی و بخش آغازین روش FWI، مدل‌سازی مستقیم می‌باشد.

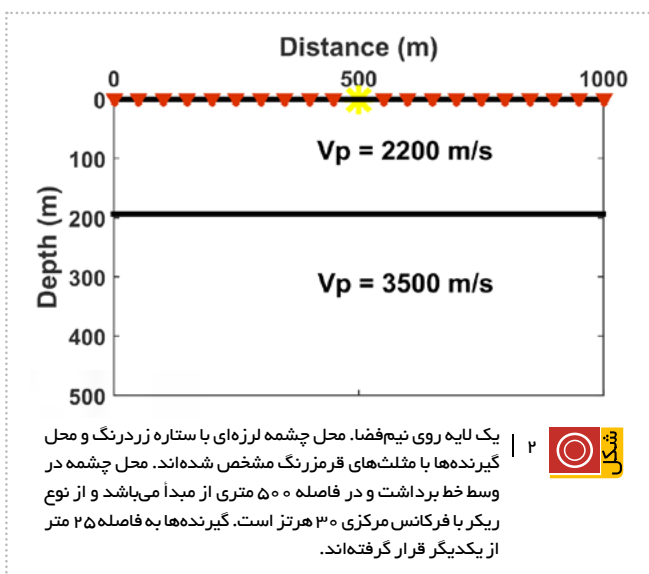
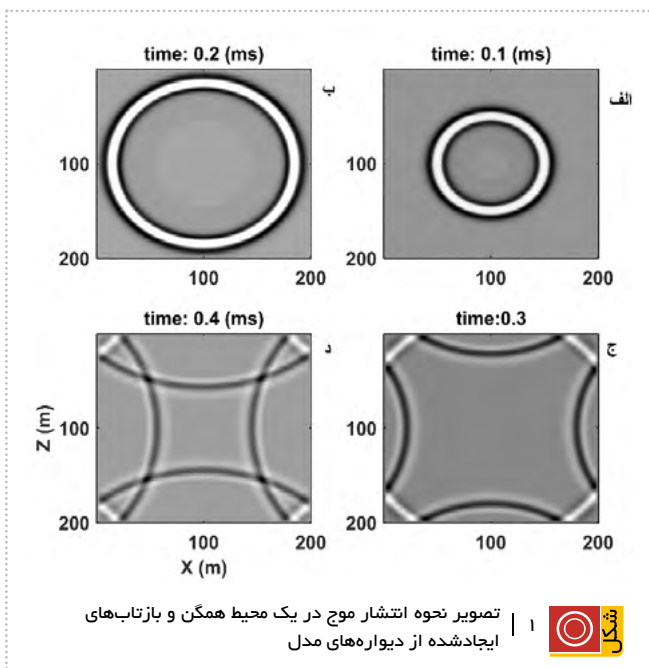
۲- بازتاب‌های مصنوعی در مدل‌سازی عددی

در مدل‌سازی چالش‌های زیادی وجود دارد که برطرف کردن هر کدام از این مسائل منجر به کارایی بهتر مدل‌سازی و رسیدن به مناسب‌ترین مدل می‌شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، تولید بازتاب‌های مصنوعی از دیواره‌های مدل است که منجر به مخدوش شدن پاسخ‌ها می‌گردد. در مباحث مدل‌سازی، به علت محدودیت حافظه رایانه نمی‌توان ابعاد مدل را بی‌نهایت در نظر گرفت و به‌ناچار باید ابعاد مدل را محدود کرد. این محدود کردن موجب ایجاد بازتاب‌های ناخواسته‌ای در مدل می‌شود که این بازتاب‌ها در واقعیت زمین‌شناسی مدل وجود نداشته و تفسیر مقطع لرزه‌نگاشت مصنوعی را دچار مشکل می‌کند.

در مدت زمان کمتری با هزینه بسیار پایین تر مدل سازی انجام می شود.

۴- مثال عددی

در این بخش، عملکرد روش ترکیبی معرفی شده بر روی مدل های متفاوت بررسی شده است. در ابتدا روش ترکیبی با نرم افزار OMNI* مقایسه شده است. یک مدل ساده را با یک لایه روی نیم فضا مشابه شکل ۲- در نظر بگیرید. شکل ۳- (الف)، (ب) و (ج) نشان دهنده مقطع چشمه مشترک حاصل از این مدل با استفاده از نرم افزار OMNI* است. شکل ۳- الف نشان دهنده اثر بازتاب های مرزی با در نظر گرفتن لایه مرزی جاذب با پهنای ۴۰ گره است. با افزایش پهنای لایه جاذب به ۴۰۰ گره در



$$B_x = (i\omega + \gamma_x)^2 \quad \text{و} \quad B_z = (i\omega + \gamma_z)^2 \quad (۴)$$

که γ_x و γ_z توابع میراگری هستند که منجر به تضعیف بازتاب ها از دیوارهای مدل می شوند. از آنجایی که در روش PML با قرارداد لایه جاذب در اطراف مدل، تعداد گره ها (درجه آزادی) افزایش می یابد؛ بنابراین زمان و حجم محاسبات افزایش می یابد. معادله موج گسسته حیطه فرکانس منجر به یک سیستم بزرگ معادلات خطی می شود که می توان آن را به صورت ماتریسی بیان نمود:

$$BU = S \quad (۵)$$

که B برابر است با:

$$B = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho(x,z)} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho(x,z)} \frac{\partial}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{K(x,z)} \quad (۶)$$

بعد از حل معادله ۵، می توان U را محاسبه نمود، ماتریس B ماتریسی مربعی است که تعداد عناصر آن برابر $(nx \times nz)^2$ می باشد و تعداد عناصر غیر صفر آن برابر است با:

$$NZ = 9 \times nx \times nx + 2 \times (nx + nz) - 8 \times (nx \times npml + nz \times npml) + 16 \times npml^2 - 12 \quad (۷)$$

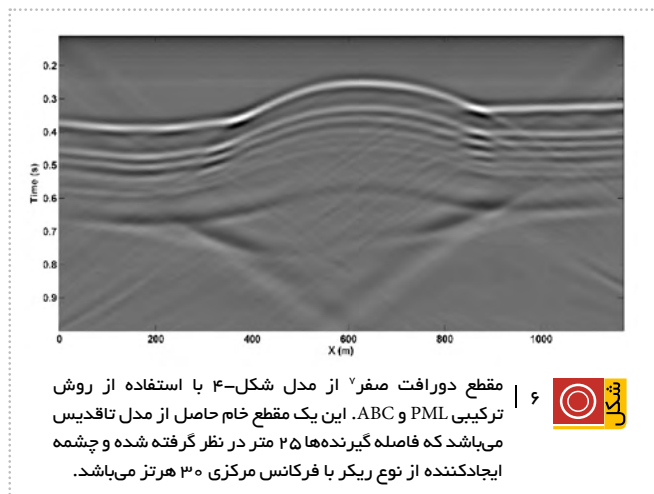
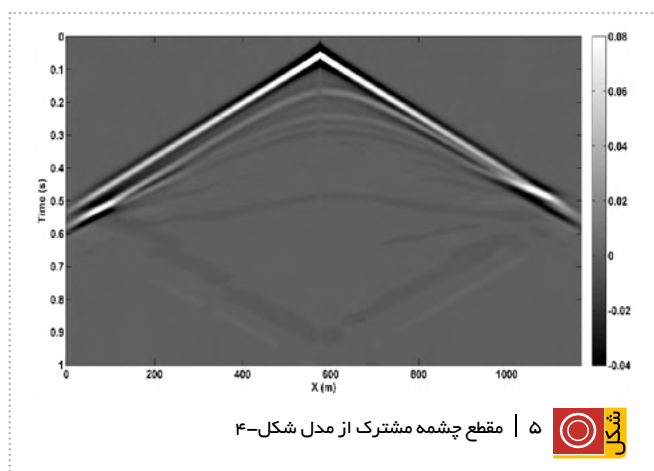
که در این رابطه npml بیانگر تعداد گره در ناحیه PML می باشد. همانطور که مشخص است، هرچه تعداد گره کمتر باشد، تعداد عناصر غیر صفر ماتریس کاهش یافته و این، منجر به کاهش حجم محاسبات می گردد.

نرم افزار OMNI* یکی از نرم افزارهای صنعتی پُر کاربرد در طراحی عملیات داده های لرزه نگاری است. در این نرم افزار برای شبیه سازی انتشار موج در مدل مفروض از روش تفاضل محدود در حوزه زمان استفاده می شود. در ابتدا برای نشان دادن اثرات بازتاب های مرزی از این نرم افزار استفاده می شود. این نرم افزار برای کاهش بازتاب های مرزی از روش لایه مرزی جاذب ارائه شده توسط سرجان و همکاران [۲] استفاده می کند که یک روش قدیمی محسوب می شود.

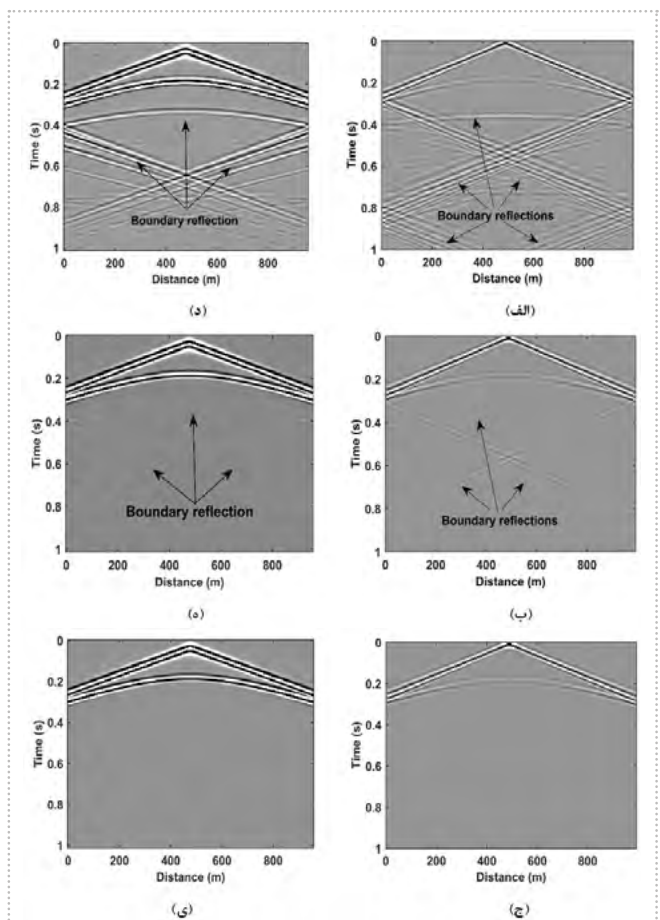
روش ABC بسیار ساده بوده و حجم محاسبات بسیار کمی دارد؛ ولی پرتو هایی که عمود بر مرز برخورد نمی کنند را به خوبی تضعیف نمی کند. از طرف دیگر، روش PML به زاویه برخورد پرتو به مرز حساس نیست؛ ولی حجم و هزینه محاسباتی را بسیار افزایش می دهد. با تلفیق این دو روش می توان با هزینه محاسباتی کمتر به نتیجه مطلوب تری دست یافت؛ زیرا با استفاده از لایه ضخامت کمتر، درجه آزادی و تعداد گره های به کار گرفته شده کمتر می شود. در نتیجه، از حجم محاسبات کاسته شده و

از روش‌های بهینه‌تر برای کاهش بازتاب‌های مصنوعی ضروری است.

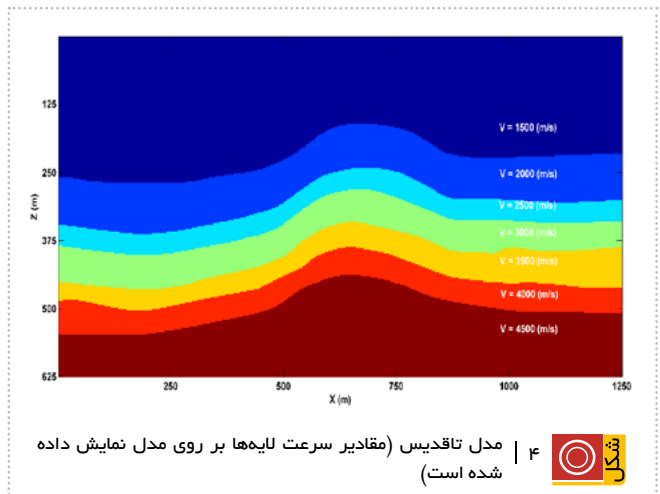
عملکرد این روش ترکیبی بر روی همان مدل شکل-۲ بررسی شده که در قسمت‌های (د)، (ه) و (ی) شکل-۳ نمایش داده شده است. در شکل (د) ناحیه مرزی با ۲۰ گره در نظر گرفته شده که اثر بازتاب‌های مصنوعی کاملاً مشخص است، که در شکل (ی) با در نظر گرفتن ۸۰ گره، بازتاب‌های مصنوعی به‌نحو مطلوبی تضعیف شده است. همان‌طور که مشخص است شکل (ج) و (ی) تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند با این تفاوت که شکل (ج) با ۴۰۰ گره توسط نرم‌افزار OMNI* حاصل شده در صورتی که شکل (ی) با ۸۰ گره توسط روش ترکیبی معرفی شده حاصل گردیده است. این مقایسه خود گواهی بر عملکرد بهتر روش جدید نسبت به نرم‌افزار می‌باشد. ابعاد مدل ۵۰۰ در ۱۰۰۰ متر بوده و محل چشمه بر روی سطح مدل با ستاره زرد رنگ مشخص گردیده است. به صورت شماتیک گیرنده‌ها به شکل مثلث‌های قرمز رنگ بر روی سطح مدل نشان داده شده است که در واقعیت، به فاصله ۲۵ متر از یکدیگر قرار گرفته و چشمه نیز از نوع موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۵ هرتز می‌باشد.



شکل (ج) بازتاب‌های مرزی به‌نحو مطلوبی کاهش یافته است ولی لایه مرزی با پهنای ۴۰۰ گره منجر به افزایش شدید حجم و زمان محاسبات خواهد شد به‌نحوی که انجام مدل‌سازی در مدل‌های واقعی را عملاً غیرممکن می‌نماید. بنابراین، استفاده



شکل ۳ | مقایسه مقاطع چشمه مشترک حاصل از نرم‌افزار OMNI* با روش ترکیبی معرفی‌شده. شکل‌های (الف)، (ب) و (ج) حاصل از نرم‌افزار OMNI* بوده که به‌ترتیب حاصل ۲۰۰، ۴۰۰ و ۴۰ گره می‌باشند. شکل‌های (د)، (ه) و (ی) حاصل از روش ترکیبی معرفی‌شده بوده که به‌ترتیب حاصل از ۲۰، ۴۰ و ۸۰ گره می‌باشند.



در نظر گرفتن ضخامت لایه مرزی با تعداد گره بالایی است که این امر منجر به افزایش درجه آزادی مدل و در نتیجه، افزایش زمان و هزینه محاسباتی می‌شود. نتایجی که از این مقاله می‌توان گرفت عبارتند از:

۱- در این مقاله با در نظر گرفتن شرط مرزی جاذب در انتهای لایه PML و ترکیب دو روش ABC و PML نشان داده شده است که با لایه مرزی با ضخامت کمتر، می‌توان با هزینه محاسباتی و زمان کمتر، به نتیجه مطلوب‌تری نیز رسید.

۲- از طرفی، نتایج حاصل از مدل‌سازی با این روش ترکیبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار OMNI* مقایسه شده و نشان داده شده که این روش با حجم محاسباتی بسیار کمتری نسبت به نرم‌افزار OMNI* به نتایج مطلوبی می‌رسد.

۳- همچنین یکی از مسائل جدید صنعت نفت بهره‌گیری از روش FWI می‌باشد که این شرایط مرزی می‌تواند به عنوان الگوریتمی برای مدل‌سازی مستقیم در روش FWI به کار گرفته شود.

۴- در نرم‌افزارهای مدل‌سازی مرسوم از جمله OMNI* مدل‌سازی فقط در حیطه زمان صورت می‌گیرد، در این مقاله با معرفی الگوریتم جدید می‌توان این مدل‌سازی را در حیطه فرکانس نیز به کار گرفت.

در شکل ۴- مدل ناهمگن پیچیده و واقعی‌تر در نظر گرفته شده است که سرعت لایه‌های مختلف بر روی مدل نشان داده شده است. از این مدل مقطع چشمه مشترک استخراج نموده که برای تضعیف امواج مصنوعی حاصل از دیواره‌ها از روش ترکیبی معرفی شده در این مقاله استفاده شده است و همان‌طور که مشخص است امواج مصنوعی به‌نحو مطلوبی تضعیف شده است (شکل ۵-). در شکل آخر مقطع دورافت صفر نظیر مدل تاقدیس نمایش داده شده است که به‌منظور استخراج این مقطع، چشمه و گیرنده را بر روی هم قرار داده و یک مقطع خام حاصل شده است. فواصل گیرنده‌ها از هم ۲۵ متر می‌باشد و چشمه مورد استفاده یک موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۳۰ هرتز می‌باشد (شکل ۶-).

نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی عددی موج و تضعیف بازتاب‌های مصنوعی ایجادشده از اطراف مدل پرداخته شد. روش PML پُرکاربردترین تکنیک در تضعیف بازتاب‌های مصنوعی از کرانه‌های مدل است. برای دستیابی به عملکرد مطلوب از این روش، نیازمند

پانویس‌ها

- | | | |
|---------------------------------|--|----------------------|
| 1. Perfect Matched Layer | 4. Society of Exploration Geophysicists | 6. Finite Difference |
| 2. Absorbing Boundary Condition | 5. European Association of Geoscientists and Engineers | 7. Zero Offset |
| 3. marmousi model | | |

منابع

- [1]. Clayton, R., & Engquist, B., Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, 67(6), 1529-1540.
- [2]. Cerjan, C., Kosloff, D., Kosloff, R., and Reshef, M., A non-reflecting boundary condition for direct acoustic and elastic wave equation, Geophysics, 1985, 50, 705-708.
- [3]. Berenger, J. P., A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, Journal of Computational Physics, 1994, 114, 185-200
- [4]. Amini, N., and Javaherian, A., A MATLAB-based frequency-domain finite-difference package for solving 2D visco-acoustic wave equation, Waves in Random and Complex Media, 2011, 21, 161-183.
- [5]. Robertsson, J. O. A., Bednar, B., Blanch, J., Kostov, C., & van Manen, D. Introduction to the supplement on seismic modeling with applications to acquisition, processing, and interpretation, Geophysics, 2007, vol. 72, no. 5, pp. SM1-SM4.
- [6]. Alaei, B., Seismic modeling of complex geological structures. In Kanoa, M., (Ed.), Seismic waves - Research and analysis, 2012, pp. 213-236.
- [7]. Gray, H.S., Etgen, J., Dellinger, J. & Whitmore, D. Seismic migration problems and solutions. Geophysics, 2001, 66, 1622-1640
- [8]. Sayers, C., & Chopra, S., Introduction to special section: Seismic modeling, The Leading Edge, 2009, 28, 528-529.
- [9]. Alaei, B., & Petersen, S.A., Geological modelling and finite difference forward realization of a regional section from the Zagros fold-and-thrust belt, Petroleum Geoscience, 2009, 13(3), 241-251.
- [10]. Franklin, A., Jonathan, B., Frequency-Domain Technique for the scalar Wave Equation, An Introduction, Massachusetts Institute Of Technology, 2005, 0-8.
- [11]. Hustedt, B., Operto, S., and Virieux, J., Mixed-grid and staggered-grid finite difference methods for frequency-domain acoustic wave modeling, Geophysical Journal International, 2004, 157, 1269-1296.