

(پژوهشی)

وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به روش مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات بهینه

فرزاد مرادپوری^{*۱}

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان
(دریافت: خرداد ۱۳۹۹، پذیرش: آبان ۱۳۹۹)

چکیده

با توجه به ضعف روش‌های تصویرسازی لرزه‌ای پرتو - مبنا، استفاده از روش‌های تصویرسازی معادله موج - مبنا همانند روش مهاجرت زمانی معکوس (RTM) به عنوان یک جایگزین مناسب در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. اما از آنجایی که تصویرسازی به روش RTM مستقیم با استفاده از بازسازی میدان موج و شرط تصویرسازی همبستگی عرضی انجام می‌شود منجر به تولید پدیده‌های کاذب می‌شود. همین مسئله از چالش‌های عمده استفاده از این روش محسوب می‌شود. از این رو در مقاله حاضر به منظور مرتفع نمودن این مشکل از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای با ترکیب دو عملگر مدل‌سازی روش RTM و مهاجرت حداقل مربعات برای تولید تصویر زیرسطحی استفاده می‌شود. به طوری که مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات (LSRTM) با استفاده از روش تندترین کاهش و در قالب گرادیان معمولی و تطبیقی به صورت یک فرآیند تکراری شامل مهاجرت مستقیم و مهاجرت وارون برای حل مسئله حداقل مربعات اجرا می‌شود تا یک مدل عمقی بهتر بر مبنای حداقل مربعات به داده‌های مشاهده‌ای برازش شود. سپس تصاویر مهاجرت‌یافته حاصل از وارون‌سازی به روش LSRTM با استفاده از دو الگوریتم معرفی شده در تکرارهای مختلف ارائه و ضمن مقایسه با همدیگر با روش RTM سنتی نیز مقایسه شده‌است. نتایج تصاویر مهاجرت‌یافته نشان از بهبود تصویر در روش LSRTM با رویکرد گرادیان تطبیقی داشته و این مقایسه از جنبه‌های دیگر همانند مقدار خطا، حساسیت به مدل سرعت، نوفه و زمان محاسبات نیز انجام گرفته و نشان‌دهنده نتایج بهتر این روش است. در نهایت میزان نزدیکی نتایج هر کدام از روش‌های فوق به مدل بازتاب‌پذیری واقعی، با هم مقایسه شده و نشان از برتری روش گرادیان تطبیقی دارد.

کلمات کلیدی

وارون‌سازی، مهاجرت زمانی معکوس، مهاجرت وارون، حداقل مربعات، تندترین شیب

* عهده‌دار مکاتبات: moradpouri.fa@lu.ac.ir

۱- مقدمه

مهاجرت یکی از مراحل اصلی پردازش داده‌های لرزه‌ای بوده و هدف اصلی آن تصویر نمودن بازتابنده‌ها در جای واقعی خود و کاهش اثرات ناشی از پراش^۱ است. روش‌های مختلفی برای مهاجرت داده‌های لرزه‌ای وجود دارد. الگوریتم‌های مهاجرت عمقی و زمانی مرسوم با استفاده از برون‌یابی میدان‌های موج چشمه و گیرنده و اعمال شرایط تصویرسازی، تصاویر لرزه‌ای را تولید می‌کنند [۱]. عدم تطابق کامل بین اصول تصویربرداری ایده‌ال و فیزیک پیچیده در شرایط واقعی دلالت بر آن دارد که همیشه بین خروجی روش‌های مهاجرت و مدل واقعی زمین اختلافاتی وجود دارد. از آنجایی که این اختلاف اجتناب ناپذیر است، یک راه‌حل برای به حداقل رساندن آن، پیشنهاد وارون‌سازی^۲ داده‌های لرزه‌ای برای تصحیح تصویر مهاجرت‌یافته به سمت بازتاب‌پذیری واقعی است. بازتاب‌پذیری^۳ به زبان ساده میزان انرژی بازتابی است که از تفاوت سرعت و چگالی در دو لایه مختلف ناشی می‌شود و بصورت امپدانس صوتی^۴ یا ضریب بازتاب^۵ نیز معرفی می‌شود.

با تکیه بر موفقیت وارون‌سازی کامل موج^۶ برای ساخت مدل سرعت، می‌توان وارون‌سازی بر مبنای برازش داده را برای تصویرسازی لرزه‌ای اعمال کرد. برخی محققین از جمله شوستر (۱۹۹۳) و نمث و همکاران (۱۹۹۹) الگوریتم‌های تصویرسازی مبتنی بر وارون‌سازی را برای مواجهه با کاستی‌های تصویرسازی لرزه‌ای مرسوم پیشنهاد دادند [۲، ۳]. نمث و همکاران (۱۹۹۹)، روش وارون‌سازی حداقل مربعات را برای خنثی‌سازی پدیده‌های کاذب روش مهاجرت کیرشهف پیشنهاد دادند. اخیراً، راه‌حل‌های حداقل مربعات بر اساس روش مهاجرت زمانی معکوس^۷ (RTM) و با استفاده از روش‌های مختلف وارون‌سازی توسط محققین زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۴-۷]. تصاویر حاصل از این روش دارای کیفیت بهتری نسبت به نتایج حاصل از الگوریتم‌های مهاجرت سنتی از نظر تعدیل پدیده‌های کاذب، روشنایی و بهبود دامنه دارد [۸-۱۰]. به موازات تحقیقات فوق، محققین بسیاری نیز بر روی بهبود مستقیم روش مهاجرت زمانی معکوس تمرکز نموده و با بهبود روش‌های انتشار موج، توسعه شرط تصویرسازی^۸ و یا حذف پدیده‌های کاذب استفاده کرده و در این راستا گام برداشته‌اند [۱۱-۱۴].

در مقایسه با الگوریتم‌های مهاجرتی که به‌طور مستقیم شرایط تصویرسازی را اعمال می‌کنند، روش تصویرسازی بر

مبنای وارون‌سازی، تصاویر عمقی را از طریق وارون‌سازی حداقل مربعات^۹ تصحیح می‌کند. از این رو، آن را مهاجرت حداقل مربعات^{۱۰} می‌نامند که معمولاً شامل چند مرحله مهاجرت مستقیم و مهاجرت وارون^{۱۱} است. به دلیل تکرارهای متعدد، روش حداقل مربعات این مزیت اصلی را دارد که می‌تواند به تدریج خطاهای ایجاد شده توسط مهاجرت اولیه ناشی از محدودیت‌های نظری یا عملی را برطرف کند. به‌طور خاص، وقتی از روش RTM به‌عنوان عملگر مهاجرت و مهاجرت وارون برای انجام مهاجرت حداقل مربعات (LSM) استفاده می‌کنیم، به آن روش مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات (LSRTM) گفته می‌شود. در روش LSRTM از حل دو طرفه معادله موج برای تصویرسازی از ساختارهای پرشیب و پیچیده استفاده می‌شود. به‌طوری که مزایای استفاده از روش LSM را به‌کار گرفته و تصویر RTM را به سمت بازتاب‌پذیری واقعی، دامنه و مکان دقیق ساختارها سوق می‌دهد. دونگ و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که LSRTM می‌تواند وضوح تصویر را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد و پدیده‌های کاذب را خنثی کند [۴].

دوکات^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۰) مهاجرت حداقل مربعات با استفاده از روش کیرشهف را با اعمال یک شرط منظم‌سازی ارائه کردند [۱۵]. هو^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۱) و یو^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۶) از روش مهاجرت حداقل مربعات در حوزه عدد موج و با فرض یک محیط لایه‌ای محلی برای کاهش زمان محاسبات استفاده نمودند [۱۶، ۱۷]. یوکی و شوستر^{۱۵} (۲۰۰۹) از مهاجرت حداقل مربعات سریع و فیلترکردن برای تصویر نمودن بازتاب‌های اولیه و چندگانه‌های استفاده کردند [۱۸]. بعدها ترکیب روش مهاجرت حداقل مربعات و روش RTM مورد استفاده قرار گرفت و دی و شوستر^{۱۶} (۲۰۱۳) از روش LSRTM بر مبنای موج تخت^{۱۷} استفاده کردند [۱۹]. برخی از محققین نیز با استفاده از روش‌های تقریب مختلف، ماتریس هسیان وارون^{۱۸} را تقریب زده و سعی در بهبود تصویر مهاجرت‌یافته با استفاده از روش LSRTM داشتند [۲۰، ۲۱]. برخی از محققین نیز برای تصویرسازی بازتاب‌های اولیه و چندگانه و حذف نوفه‌ها از تعداد تکرار زیاد در الگوریتم وارون‌سازی ارائه شده استفاده نمودند [۲۲، ۲۳]. لیو (۲۰۱۶)، با استفاده از شرط تصویرسازی همبستگی عرضی، گرادیان مورد استفاده در روش LSRTM را بهبود بخشید [۲۴]. زنگ و همکاران (۲۰۱۶) با تغییر پارامترهای مهاجرت همانند (پنجره مهاجرت^{۱۹}) سعی در بهبود روش

ماتریس $G^T G$ ، ماتریس هسیان^{۲۸} $(G^T G = H)$ و m_{mig} شکل فیلتر شده m توسط ماتریس هسیان است.

$$m_{true} = (G^T G)^{-1} m_{mig} = (G^T G)^{-1} G^T d_{obs} \quad (۶)$$
 بنابراین اگر H یک ماتریس واحد^{۲۹} باشد، مهاجرت لرزه‌ای به طور صحیح، شمایی از بازتاب‌پذیری m را بازسازی می‌کند. در صورتی که در بسیاری از موارد H یک ماتریس واحد نیست [۳].

۲-۱- مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات

روش مهاجرت زمانی معکوس داده‌های لرزه‌ای با حل عددی دو طرفه موج و طی سه مرحله اصلی شامل برون‌یابی پیشرو میدان موج چشمه^{۳۰}، برون‌یابی پسرو میدان موج گیرنده^{۳۱} و اعمال شرط تصویرسازی جهت انجام همبستگی عرضی بین دو میدان موج برون‌یابی شده جهت تولید تصویر مهاجرت‌یافته انجام می‌شود [۳۰، ۲۹]. از طرفی روش مهاجرت زمانی معکوس حداقل مربعات (LSRTM)، یک روش مدل‌سازی است که بر روی مدل شبه-بازتابی بدست آمده از مقطع مهاجرت یافته اعمال می‌شود، به طوری که مقطع مهاجرت یافته با استفاده از روش RTM با استفاده داده‌های مشاهده‌ای بدست می‌آید. از منظر تئوری انتظار می‌رود که داده‌های محاسبه‌ای^{۳۲} با استفاده از مهاجرت وارون وارون دقیقاً با داده‌های مشاهده‌ای برابر باشند، حال آنکه بخاطر تقریب‌های ذاتی روش مهاجرت (عملگر مهاجرت) و نوفه‌های موجود، داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای دقیقاً برابر نیستند. به عنوان یک راه حل عملگر مهاجرت لرزه‌ای می‌تواند به عنوان عملگر الحاقی به عملگر مدل‌سازی لرزه‌ای که در فرآیندهای وارون‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نظر گرفته شود. بنابراین، عملگر الحاقی تقریب خوبی برای وارون عملگر مدل‌سازی به حساب می‌آید، اما وارون دقیق آن نیست. با این حال، مهاجرت لرزه‌ای را می‌توان به منظور تقریب دقیق عملگر وارون‌سازی اجرا نمود و مقطع مهاجرت‌یافته می‌تواند به عنوان اولین تقریب مقطع بازتاب‌پذیری در نظر گرفته شود. برای این کار، می‌توان با استفاده از روش حداقل مربعات، مسئله را از طریق یک روند تکراری حل کرد. روش حداقل مربعات این امکان را فراهم می‌کند که پارامترهای مدل توصیف‌کننده داده‌های مشاهده‌ای به گونه‌ای محاسبه شوند که مجموع مربعات خطا مینیمم شود [۱۸]. این خطا اختلاف بین داده‌های محاسبه‌ای و داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد، به طوری که داده‌های

LSRTM داشتند [۲۵]. سان^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۷) از روش گرادیان مزدوج در فرآیند وارون‌سازی به روش LSRTM استفاده نمودند [۲۶]. همچنین لیو^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۸)، روش کدگذاری فاز تصادفی در قالب گسترش ثابت هندسه برداشت را به کار گرفتند [۲۷].

لذا در مقاله حاضر از تلفیق^{۲۲} دو روش RTM و LSM برای تولید تصویر لرزه‌ای زیرسطحی استفاده می‌شود، به طوری که این فرآیند تکراری با ترکیب مهاجرت حداقل مربعات با عملگر مدل‌سازی زمانی معکوس و با استفاده از دو روش وارون‌سازی گرادیان معمولی و تطبیقی انجام خواهد گرفت. بنابراین انتظار می‌رود که نتیجه و کیفیت تصویرسازی حاصل از روش فوق از نتایج هرکدام از روش‌های فوق به تنهایی بهتر بوده و ظهور پدیده‌های کاذب در تصویر مهاجرت یافته مرتفع گردد.

۲- وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای

با فرض خطی بودن مسئله مدل‌سازی و مهاجرت داده‌های لرزه‌ای، می‌توان طبق رابطه (۱) نوشت:

$$d = G_m \quad (۱)$$

به طوری که d بردار مدل داده‌های لرزه‌ای ثبت شده، m بردار پارامترهای مدل بازتاب‌پذیری و G ماتریس کرنل یا ماتریس حساسیت^{۲۳} نام دارد که در اینجا عملگر مدل‌سازی پیشرو^{۲۴} (مهاجرت وارون) بوده و داده‌ها و پارامترهای مدل را به هم مرتبط می‌سازد، نتیجه انتخاب الگوریتم‌های متفاوت برای عملگر مدل‌سازی باعث تولید روش‌های مختلف مهاجرت حداقل مربعات خواهد شد. داده‌های مشاهده‌ای^{۲۵} d_{obs} به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$d_{obs} = G_o m_{true} \quad (۲)$$

به طوری که m_{true} بازتاب‌پذیری واقعی^{۲۶} است و فرض می‌شود که $G = G_o$ ، به طوری که:

$$d_{obs} = G m_{true} \quad (۳)$$

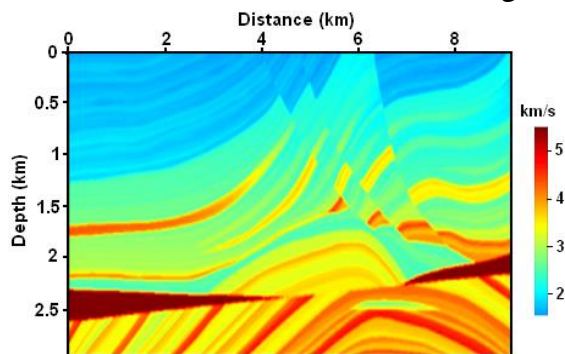
در مهاجرت لرزه‌ای، G^T عملگر الحاقی^{۲۷} است، به عبارت دیگر عملگر RTM است که به عملگر مدل‌سازی G الحاق شده‌است و در رابطه (۱) به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$m_{mig} = G^T d_{obs} \quad (۴)$$

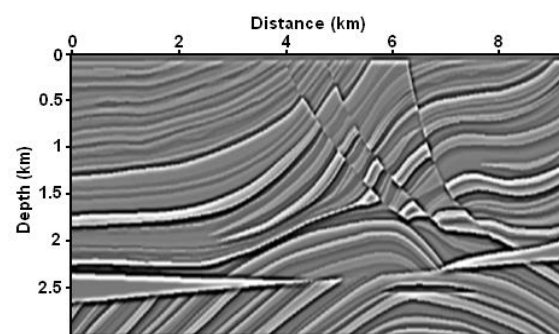
بر طبق دی و همکاران (۲۰۱۲)، m_{mig} نتیجه مهاجرت داده‌های d_{obs} یا تصویر مهاجرت یافته است. جایگزینی رابطه (۱) در رابطه (۴) نتیجه می‌دهد [۲۸]:

$$m_{mig} = G^T G m_{true} \quad (۵)$$

مارموزی استفاده شده است. همچنین با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای چشمه، تغییرات سرعت مدل مازموزی و تقریب بورن^{۳۷} مرتبه صفر، عملگر مدل‌سازی مستقیم RTM اجرا شده و تقریب اولیه‌ای از بازتاب‌پذیری به دست آمد که با اعمال فیلتر لاپلاسین با درجات مختلف در جهت قائم و افقی و هموار نمودن مدل سرعت، ضمن حذف نوفه‌های فرکانس پایین، تصویر بازتاب‌پذیری بهتری به دست آمد که در شکل ۲، نشان داده شده است.



شکل ۱: تغییرات سرعت مدل در مدل مازموزی [۳۲].



شکل ۲: بازتاب‌پذیری مدل مازموزی

۴- بهینه‌سازی به روش LSRTM

فرآیند بدست آوردن داده‌های محاسبه‌ای از طریق فرآیند مهاجرت وارون بر روی مقطع مهاجرت‌یافته با عملگر روش RTM انجام می‌شود. به طوری که پس از هموار نمودن مدل سرعت، داده‌های مشاهده‌ای مهاجرت داده شده و به این ترتیب مقطع مهاجرت‌یافته (m_0) بدست می‌آید. از این رو مقطع مهاجرت‌یافته به عنوان مدل اولیه (m_0) ورود به فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سپس به ترتیب عملگر مهاجرت وارون با بکارگیری تقریب بورن بر روی مقطع مهاجرت‌یافته (m_0) اعمال شده و داده‌های محاسبه‌ای تولید می‌شوند. برای مجموعه داده‌ها فرآیند بهینه‌سازی به روش LSRTM یک فرآیند تکرار شونده است که الگوریتم آن در جدول ۱، ارائه شده است.

مشاهده‌ای مجموعه داده‌های چشمه‌ها^{۳۳} در حوزه زمان است. داده‌های محاسبه‌ای نیز توسط مهاجرت وارون مقطع مهاجرت‌یافته و با آرایش یکسان با داده‌های مشاهده‌ای محاسبه می‌شوند. در مقاله حاضر، از روش تندترین کاهش^{۳۴} استفاده شده است. در این روش بدست آوردن پاسخ با به حداقل رساندن تابع هدف $J(m)$ که مقدار عدم برآزش بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه‌ای و مینیمم نمودن مربع اختلاف آنها است، در حوزه زمان و به صورت رابطه (۷) ممکن می‌شود.

$$J(m) = \|G_m - d_{obs}\|^2 \quad (7)$$

روابط (۸) تا (۱۰) مراحل را برای محاسبه پاسخ کوچکترین مربعات نشان می‌دهد:

$$G_k = G^T(Gm_k - d_{obs}) \quad (8)$$

$$\alpha_k = \left[\frac{(g_k^T g_k)}{((Gg_k)^T (Gg_k))} \right] \quad (9)$$

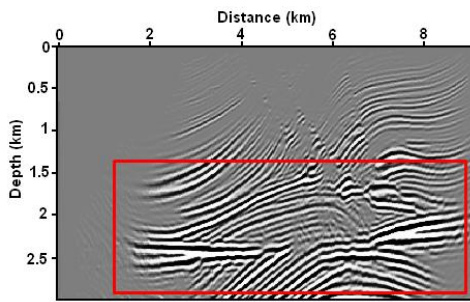
$$m_{k+1} = m_k - \alpha_k g_k \quad (10)$$

رابطه (۸) نشان‌دهنده خطای مهاجرت بین داده‌های محاسبه شده و داده‌های مشاهده شده مرتبط با مدل m_k است. این باقیمانده بردار مهاجرت به عنوان بردار گرادیان در m_k در همان راستا اما با جهت مخالف تعریف می‌شود [۳۱]. بردار گرادیان توسط g_k نشان داده شده است، نقاط این بردار در جهت حداکثر شیب قرار دارند. پارامتر α_k نشان دهنده اندازه گام در هر تکرار در فرآیند بهینه‌سازی است و k تعداد تکرار است. رابطه (۱۰) نتیجه تصویر مهاجرت‌یافته بهینه است که در هر تکرار به روز می‌شود.

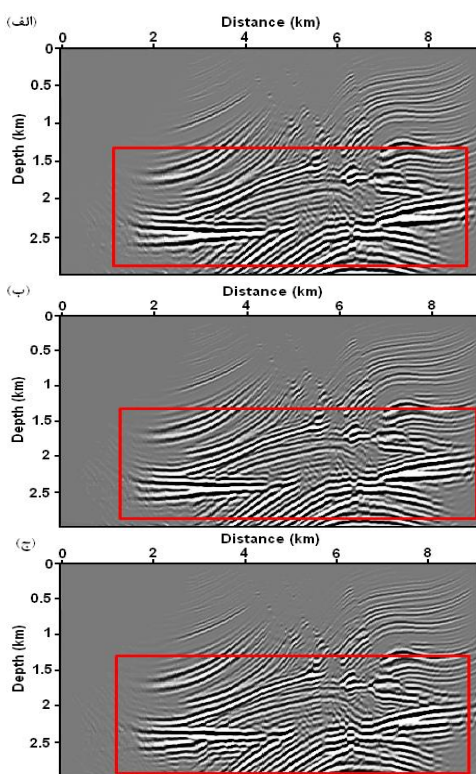
۳- آنالیز عددی

در مقاله حاضر به جهت آزمایش فرآیند وارون‌سازی روش LSRTM از داده‌های مصنوعی مدل مازموزی^{۳۵} استفاده شد. مدل مازموزی یک مدل دو بعدی مصنوعی شناخته شده است که توسط موسسه نفت فرانسه و بر اساس یک مدل واقعی زمین‌شناسی در منطقه کوانزا^{۳۶} در کشور آنگولا ساخته شده است (شکل ۱). این مدل شامل دو بخش زمین‌شناسی است. بخش اول، رسوبات کربناته‌ای است که در ابتدا دچار چین‌خوردگی شده و سپس فرسایش یافته و منجر به تشکیل یک ساختار تاقدیسی و تله مواد هیدروکربوری شده است. در بخش دوم، یک سری تشکیلات تبخیری نمکی به شکل گنبدی، آهک‌های رسی و سپس رسوبات شیلی، ماسه سنگی و رسوبات آواری، تشکیل شده که به شدت تحت تأثیر گسل‌های نرمال قرار گرفته‌اند [۳۲]. در این تحقیق، از بخش نشان داده شده در شکل ۱، از مدل

با افزایش تعداد تکرارها به سمت ناپایداری بیشتر پیش رفته و کیفیت تصویر حاصل کاهش پیدا کرده است.



شکل ۳: نتیجه RTM سنتی بر روی مدل مارموزی (m_0) پس از اعمال فیلتر لاپلاسی



شکل ۴: نتایج مهاجرت قبل از برنابارش به روش گرادیان معمولی - LSRTM، (الف) در تکرار ۱۰، (ب) در تکرار ۲۰، (ج) در تکرار ۳۰

در این بخش نتایج بهینه‌سازی LSRTM با استفاده از روش گرادیان تطبیقی ارائه شده‌است. در این روش طی فرآیند بهینه‌سازی تصویر، برخی تغییرات برای به دست آوردن تصویر با وضوح بهتر انجام شد. اصلی‌ترین آن محاسبه پارامتر α_k با استفاده از روش گرادیان تطبیقی برای به روزرسانی مدل فعلی بود. با این تغییر، یکی از مراحل مهاجرت وارون حذف می‌شود، زیرا محاسبه پارامتر (α_k) با استفاده از ماتریس باقیمانده انجام می‌شود، حال آنکه در

جدول ۱: الگوریتم وارون‌سازی به روش LSRTM

```

 $m_0$  initial model
 $r = d_{obs} - Gm_0$ 
for  $k = 1, k_{max}$  do
 $g_k = G^T r_k$ 
 $q_k = Gg_k$ 
 $\alpha_k = (g_k, g_k) / (q_k, q_k)$ 
 $m_{k+1} = m_k - \alpha_k g_k$ 
 $r_{k+1} = d_{obs} - d_{calc}$ 
end for
return  $m$ 
    
```

در پایان هر تکرار، مدل m_k به m_{k+1} بروزرسانی شده و سپس با استفاده از مهاجرت وارون، یک داده محاسبه‌ای جدید تولید می‌شود که به ترتیب وارد معادله خطا می‌شود و با تشکیل ماتریس باقیمانده بعدی (r_k) روند تکرار شونده ادامه می‌یابد. تصویر نهایی با تکرار فرآیند تا تعداد تکرار (k_{max}) یا تا زمانی که تابع هدف به حداقل مقدار برسد، بدست می‌آید. بنابراین، برای هر تکرار دو مهاجرت وارون و یک مهاجرت مستقیم انجام شده‌است.

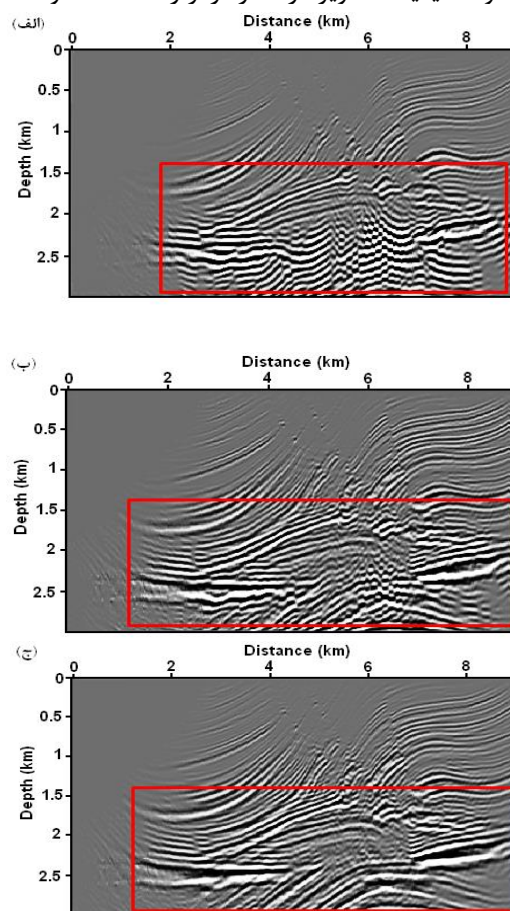
۴-۱-۲ LSRTM با استفاده از روش گرادیان معمولی و گرادیان تطبیقی

در این بخش نتایج بهینه‌سازی LSRTM با استفاده از روش گرادیان معمولی برای مدل مارموزی ارائه شده‌است. روش گرادیان معمولی همان روش تندترین کاهش است که برای محاسبه اندازه گام α لازم است که در هر تکرار، مهاجرت وارون گرادیان (g_k) انجام شود. از این رو هزینه محاسباتی آن نسبت به روش گرادیان تطبیقی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، بیشتر است. در شکل ۳، نتیجه مهاجرت به روش RTM سنتی (m_0) پس از اعمال فیلتر لاپلاسی نشان داده شده‌است، که برای شروع فرآیند وارون‌سازی استفاده خواهد شد. همچنین در شکل ۴ (الف تا ج)، نتایج بهینه‌سازی به روش گرادیان معمولی - LSRTM، به ترتیب برای تکرارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰، نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل ۴ (الف تا ج) نشان داده شده‌است (بویژه در کادر قرمز رنگ)، نتایج به دست آمده با روش گرادیان معمولی - LSRTM با بروزرسانی تصویر در تکرارهای بعدی، نتایج بهتری از مهاجرت به روش RTM سنتی را بدست نمی‌دهد. این امر می‌تواند ناشی از کامل نبودن عملگر مهاجرت وارون و محاسبه اندازه گام توسط بردار گرادیان باشد که باعث ناپایداری عملکرد این روش شده‌است. به طوری که حتی نتایج حاصل از خود روش گرادیان معمولی - LSRTM نیز

بر طبق آنچه که در دو بخش فوق ارائه شد، تصاویر بهینه‌سازی شده با استفاده از روش گرادیان معمولی نتایج بهتری نسبت به مهاجرت RTM سنتی به همراه نداشتند. دلیل این امر به فرآیند مهاجرت وارون مقطع گرادیان g_k بر می‌گردد، که می‌تواند داده‌های با دامنه‌های تغییر یافته نسبت به داده‌های ورودی (باقیمانده) تولید کند. این باعث می‌شود که هنگام محاسبه اندازه گام α_k ، مربع نرم داده‌های مهاجرت وارون که دارای دامنه همدوس نیستند، محاسبه شود. از این رو، مقادیر اندازه گام نامنظم بوده و نتایج مهاجرت به روزرسانی شده آن در مقایسه با مهاجرت RTM سنتی دارای برتری نبوده و حتی با افزایش تکرارها در تصاویر حاصل از خود روش گرادیان تطبیقی-LSRTM نیز بهبود محسوسی مشاهده نشد. در مقایسه با روش RTM سنتی و گرادیان معمولی، تصاویر تولید شده با استفاده از روش گرادیان تطبیقی وضوح بسیار بالاتری دارند، چرا که در این روش به جای مهاجرت وارون مقطع بر طبق گرادیان g_k ، داده‌های ورودی (باقیمانده) که دارای دامنه‌های همدوس هستند، استفاده می‌شود. بنابراین، مقادیر α_k منظم‌تر هستند و نتایج بهتری را نسبت به روش مهاجرت RTM سنتی و گرادیان معمولی بدست می‌دهد. همچنین در روش گرادیان تطبیقی با افزایش تعداد تکرارها نتایج حاصل از خود روش گرادیان تطبیقی نیز بهبود می‌یابند. علاوه بر این در این روش در هر تکرار یک مهاجرت وارون کمتر انجام می‌شود که از نظر محاسباتی زمان اجرا را کاهش می‌دهد.

یک روش برای ارزیابی اینکه آیا داده‌های محاسبه‌ای تقریب خوبی از داده‌های مشاهده‌ای هستند، تحلیل رفتار عملکرد تابع هدف $J(m)$ مربوط به تعداد تکرارها است. شکل ۶، تغییرات تابع هدف $J(m)$ را به‌عنوان مقدار خطا عدم برازش بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای با افزایش تکرارها نشان می‌دهد، به طوری که نشان از میزان خطای کمتر روش گرادیان تطبیقی نسبت به روش گرادیان معمولی با افزایش تکرارها دارد. همچنین تحلیل خطای حاصل از روش گرادیان معمولی نشان از افزایش خطا با افزایش تکرارها دارد که همین مسئله به‌گونه‌ای دیگر و در قالب کاهش کیفیت تصاویر حاصل از این روش با افزایش تکرارها در شکل ۴ (الف تا ج) تایید شد. همچنین به جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش‌های RTM سنتی، روش گرادیان معمولی-LSRTM و روش گرادیان تطبیقی-LSRTM، نمودار طیف‌های عدد موج حاصل از روش‌های فوق با هم مقایسه

روش گرادیان معمولی با استفاده از گرادیان مهاجرت وارون انجام می‌شد. این تطبیق مناسب است، زیرا ماتریس باقیمانده، داده‌های لرزه‌ای ورودی برای انجام مهاجرت جهت به دست آوردن گرادیان است. بنابراین، مهاجرت گرادیان به نوعی معادل بدست آوردن دوباره ماتریس باقیمانده است. با ارجاع مجدد به نتیجه روش RTM سنتی (m_0) در شکل ۳، برای شروع فرآیند وارون‌سازی، نتایج بهینه‌سازی به روش گرادیان تطبیقی-LSRTM، به ترتیب برای تکرارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰، در شکل ۵ (الف تا ج)، نشان داده شده‌است. نتایج به دست آمده برای مدل مارموزی با روش LSRTM و بر اساس روش گرادیان تطبیقی، نشان دهنده بهبود نتایج در مقایسه با روش RTM سنتی و روش گرادیان معمولی-LSRTM است. این امر نتیجه اصلاح فرآیند وارون‌سازی با استفاده از روش گرادیان تطبیقی-LSRTM می‌باشد. همچنین شایان ذکر است که نتایج حاصل از روش گرادیان معمولی-LSRTM با افزایش تکرارها در حال بهبود می‌باشد (به تفاوت کیفیت تصاویر در کادر قرمز رنگ دقت شود).



شکل ۵: نتایج مهاجرت قبل از برانبارش به روش گرادیان تطبیقی-LSRTM، (الف) در تکرار ۱۰، (ب) در تکرار ۲۰، (ج) در تکرار ۳۰

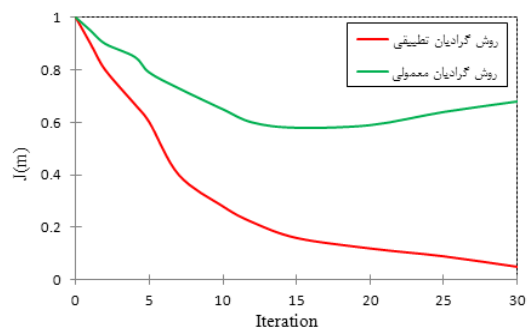
۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر در ابتدا مبانی روش مهاجرت حداقل مربعات، مسئله وارون‌سازی و همچنین مهاجرت به روش RTM و ترکیب آن با روش حداقل مربعات در قالب روش مهاجرت LSRTM ارائه شد. سپس فرآیند وارون‌سازی به روش LSRTM با استفاده از دو روش گرادین معمولی و گرادین تطبیقی اجرا و نقاط قوت و ضعف هر کدام از روش‌ها بحث شد. به طوری که در نتایج حاصل از روش گرادین معمولی-LSRTM نسبت به روش RTM سنتی بهبود چندانی حاصل نشد که این مسئله ناشی از ضعف در عملکرد مهاجرت وارون و محاسبه اندازه گام با استفاده از داده‌های با دامنه ناهمدوس ارزیابی شد. از این رو به عنوان راه‌حل در این تحقیق از روش وارون‌سازی گرادین تطبیقی استفاده شد. به طوری که در این روش از داده‌های ورودی (باقیمانده) که دارای دامنه‌های همدوس هستند در محاسبه یک اندازه گام منظم استفاده شد. از این رو تصاویر حاصل در مقایسه با هر دو روش RTM سنتی و گرادین معمولی حتی در تکرارهای ابتدایی بهبود پیدا نمود. بهبود در فرآیند تصویرسازی در خود روش گرادین تطبیقی-LSRTM نیز با افزایش تکرارها از جمله نکات قابل توجه در این روش بود. علاوه بر این در الگوریتم بهینه‌سازی روش گرادین تطبیقی، محاسبه اندازه گام با استفاده از ماتریس باقیمانده باعث حذف یک مهاجرت وارون در هر تکرار شد که همین امر باعث کاهش زمان محاسبات گردید.

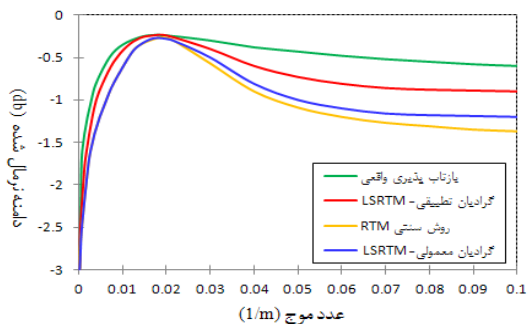
مراجع

- [1] Moradpouri, F. (2019). Presentation a new and efficient imaging condition in reverse time migration Authors, Journal of analytical and numerical methods in mining engineering, 9(20), pp. 81-87. (In Persian)
- [2] Schuster, G.T. (1993). Least-squares cross-well migration. Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp.110-113.
- [3] Nemeth, T., Wu, C. & Schuster, G.T. (1999). Least-squares migration of incomplete reflection data. Geophysics, 64(1), pp. 208-221.
- [4] Dong, S., Cai, J., Guo, M., Suh, S., Zhang, Z., Wang, B. & Li, Z. (2012). Least-squares reverse time migration towards true amplitude imaging and improving the resolution. 82nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp. 1-5.
- [5] Xue, Z., Chen, Y., Fomel, S. & Sun, J. (2016). Seismic imaging of incomplete data and simultaneous-source data using least-squares reverse time migration with shaping regularization. Geophysics, 81, S11-S20.

شد که در شکل ۷، نشان داده شده است. این نتایج نشان از برتری نتایج حاصل از روش گرادین تطبیقی-LSRTM و نزدیک تر بودن آن به مدل بازتاب‌پذیری واقعی، نسبت به سایر روش‌ها دارد. به طور خلاصه مقایسه بین سه روش مورد استفاده بر اساس میزان نوفه، حساسیت به خطا در مدل سرعت، زمان محاسبات و کیفیت تصویر در جدول ۲، ارائه شده است.



شکل ۶: نمودار رفتار تابع هدف $J(m)$ به عنوان تابعی از تکرارها برای دو روش گرادین معمولی-LSRTM و گرادین تطبیقی - LSRTM



شکل ۷: نمودار طیف‌های عدد موج نتایج تصویرسازی برای مدل مارموزی

جدول ۲: مقایسه بین عملکرد سه روش مورد استفاده

LSRTM گرادین تطبیقی	LSRTM گرادین معمولی	روش RTM سنتی	
		بسیار بالا (نیاز به فیلتر یا سایر روش‌های حذف نوفه)	نوفه
خیلی پایین	پایین		حساسیت به خطای مدل سرعت
بالا	بالا	خیلی بالا	حجم محاسبات
۱،۲	۱،۷	۱	نسبت به روش سنتی RTM
خوب	متوسط	پایین (نیاز به پردازش مجدد)	کیفیت تصویر اولیه

- [22] Wong, M., & Biondi, B. (2014). Imaging with multiples using least-squares reverse time migration: The Leading Edge, 33, 970-972.
- [23] Liu, Y., X. Liu, A. Osen, Y. Shao, H. Hu, & Zheng, Y. (2016b). Least squares reverse time migration using controlled-order multiple reflections: Geophysics, 81(5), S347-S357.
- [24] Liu, Q. (2016). Improving the gradient in least-squares reverse time migration. Journal of Geophysics and Engineering, 13(2), pp.172-180.
- [25] Zeng, C., Dong, S., Wu, Z., Ji, J., Armentrout, D. & Wang, B. (2016). Practical Application of Adaptive Least-Squares Reverse Time Migration (LSRTM) to Advance Field Development and Uncover New Reserves in the Subsalt Provinces. AAPG/SEG International Conference & Exhibition, Cancun, Mexico.
- [26] Sun, X.D., Ge, Z.H. and Li, Z.C. (2017). Conjugate gradient and cross-correlation based least-square reverse time migration and its application. Applied Geophysics, 14(3), pp.381-386.
- [27] Liu, X., Liu, Y. & Khan, M. (2018). Fast least-squares reverse time migration of VSP free-surface multiples with dynamic phase-encoding schemes: Geophysics, 83(4), S321.S332.
- [28] Dai, W., Fowler, P., & Schuster, G. T. (2012). Multisource least-squares reverse time migration: Geophysical Prospecting, 60, 681-695.
- [29] 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.
- [30] Moradpouri, F. (2020). Seismic Wave-Field Propagation Modelling using the Euler Method, Computational Methods in Engineering, 38(2), 115-123.
- [31] Porsani, M. J., & Oliveira, S. P. (2008). Linearized seismic waveform inversion using a multiple re-weighted least-squares method with QR preconditioning. Geophysical prospecting, 56(1), 61-68.
- [32] Versteeg, R. J. (1993). Sensitivity of prestack depth migration to the velocity model. Geophysics, 58(6), 873-882.
- [6] Dai, W. & Schuster, G.T. (2013). Plane-wave least-squares reverse-time migration. Geophysics, 78, S165-S177.
- [7] Zeng, C., Dong, S. & Wang, B. (2014). Least-squares reverse time migration: inversion-based imaging toward true reflectivity. Lead. Edge 33, 962-968.
- [8] Luo, S. & Hale, D. (2014). Least-squares migration in the presence of velocity errors. Geophysics, 79, S153-S161.
- [9] Dutta, G. & Schuster, G.T. (2014). Attenuation compensation for least-squares reverse time migration using the viscoacoustic-wave equation. Geophysics, 79, S251-S262.
- [10] Aldawood, A., Hoteit, I., Zuberi, M., Turkiyyah, G. & Alkhalifah, T. (2015). The possibilities of least-squares migration of internally scattered seismic energy. Geophysics, 80, S93-S101.
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] Cai, X., Liu, Y., & Ren, Z. (2018). Acoustic reverse-time migration using GPU card and POSIX thread based on the adaptive optimal finite-difference scheme and the hybrid absorbing boundary condition. Computers & Geosciences, 115, 42-55.
- [14] Costa, J. C., Medeiros, W. E., Schimmel, M., Santana, F. L., & Schleicher, J. (2018). Reverse time migration using phase crosscorrelation. Geophysics, 83(4), S345-S354.
- [15] Duquet, B., K. J. Marfurt, & Dellinger, J.A. (2000). Kirchhoff modeling, inversion for reflectivity, and subsurface illumination: Geophysics, 65, 1195-1209.
- [16] Hu, J., G. T. Schuster, & Valasek, P.A. (2001). Poststack migration deconvolution: Geophysics, 66, 939-952.
- [17] Yu, J., J. Hu, G. T. Schuster, & Estill, R. (2006). Prestack migration deconvolution: Geophysics, 71, S53-S62.
- [18] Aoki, N., & Schuster G. T. (2009). Fast least-squares migration with a deblurring filter: Geophysics, 74(6), WCA83-WCA93.
- [19] Dai, W., and G. T. Schuster, (2013), Plane-wave least-squares reverse-time migration: Geophysics, 78(4), S 165-S177.
- [20] Wang, Y. and Yang, C. (2010). Accelerating migration deconvolution using a nonmonotone gradient method: Geophysics, 75, S131-S137.
- [21] Guitton, A. (2004). Amplitude and kinematic corrections of migrated images for nonunitary imaging operators: Geophysics, 69, 1017-1024.

-
- ^۱ Diffraction
 - ^۲ Inversion
 - ^۳ True reflectivity
 - ^۴ Acoustic impedance
 - ^۵ Reflection coefficient
 - ^۶ Full-waveform inversion (FWI)
 - ^۷ Reverse time migration (RTM)
 - ^۸ Imaging Condition
 - ^۹ Least square inversion
 - ^{۱۰} least-squares migration (LSM)
 - ^{۱۱} Demigration
 - ^{۱۲} Duquet
 - ^{۱۳} Hu
 - ^{۱۴} Yu
 - ^{۱۵} Aoki and Schuster
 - ^{۱۶} Dai and Schuster
 - ^{۱۷} Plane wave
 - ^{۱۸} Inverse Hessian matrix
 - ^{۱۹} Migration aperture
 - ^{۲۰} Sun
 - ^{۲۱} Liu
 - ^{۲۲} Integration
 - ^{۲۳} Sensitivity matrix
 - ^{۲۴} Forward modelling operator (demigration)
 - ^{۲۵} Observed data
 - ^{۲۶} True reflectivity
 - ^{۲۷} Adjoint operator
 - ^{۲۸} Hessian Matrix (H)
 - ^{۲۹} Identity matrix
 - ^{۳۰} Source wavefield extrapolation
 - ^{۳۱} Receiver wavefield extrapolation
 - ^{۳۲} Calculated data
 - ^{۳۳} Shots
 - ^{۳۴} steepest descent
 - ^{۳۵} Marmousi
 - ^{۳۶} Cuanza
 - ^{۳۷} Born