

تصویرسازی لرزه‌ای ساختارهای پیچیده با استفاده از تهیه مدل سرعت به روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی

احسان نظری ولاشانی^۱، مهرداد سلیمانی منفرد^{۲*}، امین روشندل کاهو^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

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

(دریافت: اسفند ۱۳۹۷، پذیرش: دی ۱۳۹۸)

چکیده

حضور لایه‌های پرسرعت معمولاً مهم‌ترین عامل ایجاد تباین سرعت بالا در ساختارهای پیچیده است. استفاده از مزایای هر دو روش توموگرافی شبکه‌ای و لایه‌ای در ساخت مدل سرعت می‌تواند بر بخشی از مشکلات تصویر سازی لرزه‌ای در این گونه ساختارها فائق آید. بنابراین روش‌های هیبریدی به منظور افزایش صحت مدل سرعت معرفی شدند. در این پژوهش با تغییر استراتژی روش هیبریدی، اثر تباین بالای مدل سرعت در به روز رسانی مدل و به دنبال آن تصویرسازی عمقی کاهش داده شد. در ابتدا مدل سرعت ساده به روش توموگرافی تهیه شده و محدود به تباین بالای سرعت مشخص می‌شود. سپس محدود به آنومالی سرعت به عنوان محدود ساخت با مرزهای سخت انتخاب شده و سایر قسمت‌ها محدود نرم شناخته می‌شوند. مرزهای با عدم قطعیت بالا در تعیین موقعیت مکانی رخدادها، به عنوان مرزهای نرم شناخته می‌شوند. در ادامه محدودهای جدا شده هم‌زمان ولی مستقل به روش توموگرافی به روز رسانی شده و مدل سرعت میانی حاصل می‌شود. در گام نهایی با انجام چند تکرار و به روز رسانی به روش توموگرافی برای کل مدل سرعت، مرزهای تیز از بین رفته و مدل سرعت نهایی حاصل می‌شود. مرزهای سخت دارای کمترین و مرزهای نرم دارای بیشترین تغییر در مکان خواهند بود. در بین گام‌های تهیه مدل سرعت، فرایند کوچ عمقی جهت کنترل صحت مدل سرعت انجام می‌شود. در نهایت کوچ عمقی به کمک مدل سرعت نهایی انجام خواهد شد. این روش بر روی یک داده لرزه‌ای دارای گنبد نمکی پیاده گردید. نتیجه نهایی کوچ عمقی بیانگر توانایی استراتژی پیشنهادی در برطرف کردن معضل به روز رسانی سرعت در فراند توموگرافی است.

کلمات کلیدی

توموگرافی لایه‌ای، توموگرافی شبکه‌ای، توموگرافی هیبریدی، تصویرسازی لرزه‌ای، ساختارهای پیچیده

* عهده‌دار مکاتبات: msoleimani@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

توامان می‌تواند به منظور کاهش خطای مدل سرعت و افزایش هم‌خوانی داده‌ها با مدل به کار برده شود [۶]. بدین ترتیب خطای هر لایه در فرایند به روزسانی مدل، به لایه‌های زیرین انتقال نخواهد یافت. بدین ترتیب می‌توان روش به روز رسانی تکرار مدل سرعت در کوچ عمقی پیش از برانبارش را به منظور حذف اثر آنومالی‌های سرعت سطحی در برداشت‌های تصویری مشترک به منظور بررسی میزان هم‌خوانی مدل سرعت با داده‌ها استفاده کرد [۷]. همچنین می‌توان نشان داد که روش‌های توموگرافی پرتو^۱، در صورتی که نقاط سرعت باقی‌مانده به خوبی قابل انتخاب نباشند، کارکرد خود را از دست خواهد داد [۸]. در همین راستا، معکوس‌سازی برونراد باقی‌مانده^۲ در کوچ عمقی پیش از برانبارش کیرشلف و رابطه غیرخطی در توموگرافی سه‌بعدی مدل سرعت برای کاهش خطای مدلسازی می‌تواند استفاده شود [۹، ۱۰]. با توجه به دقت بالای روش توموگرافی شبکه‌ای در تخمین مدل سرعت، این روش قابلیت تصویرسازی تغییرات ساختاری کوچک را نیز دارد [۱۱]. پیشرفت در افزایش دقت روش‌های توموگرافی شبکه‌ای مدل سرعت به گونه‌ای بود که از آن در تصویرسازی ساختار پیچیده در زیر زون گسله و پایش ذخیره‌سازی دی اکسیدکربن می‌توان استفاده کرد [۱۲، ۱۳]. با این حال این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی هستند که کاربرد آنها را محدود می‌کند. به عنوان نمونه، تعداد زیاد نقاط لازم به منظور انجام عمل توموگرافی مدل سرعت در بیشتر موارد، از مشکلات اصلی در این دسته از روش‌ها است [۱۴]. معمولاً این نقاط، چه در روش خودکار و چه در روش دستی، از روی سطح بازتابنده در مدل در انتخاب می‌شوند که هرچه تعداد آنها بیشتر باشد، دقت تصویر نهایی افزایش خواهد داشت.

۲- تهیه مدل سرعت در روش توموگرافی

در روش توموگرافی شبکه‌ای در ابتدا پس از تهیه مدل سرعت اولیه، مرزهای آنومالی سرعت در عمق تعیین شده و همچنین سرعت میان لایه توسط توابع اسپلاین^۳ بر روی گره‌ها مشخص می‌شوند. در این مرحله، مقاطع دورافت مشترک داده‌های پیش پردازش شده تهیه خواهد شد [۱۵]. سپس بر روی این مقاطع، یک رخداد پیوسته مشخص شده و دستچین می‌شود. نقاط دستچین شده،

مدل سرعت لرزه‌ای دقیق نقش بسزایی در تهیه تصویر لرزه‌ای مطلوب از ساختارهای زیر سطحی دارد. در این بین روش‌های تصویرسازی عمقی حساسیت بیشتری نسبت به دقت و صحت مدل لرزه‌ای در مقایسه با تصویرسازی زمانی از خود نشان می‌دهند [۱]. معمولاً تهیه مدل سرعت فرایندی بسیار پیچیده و در برخی موارد زمان‌بر است. لذا به منظور تسهیل در ساخت مدل سرعت، بیشتر روش‌های تهیه مدل سرعت از یک سری فرضیات و ساده‌سازی‌ها درباره محیط انتشار موج استفاده می‌کنند. این ساده‌سازی‌ها در مراحل اولیه تصویرسازی آسیب‌چندانی به دقت مدل سرعت اولیه وارد نمی‌کنند. چرا که مدل اولیه یک مدل کاملاً ضمنی است و تنها به منظور ایجاد زمینه‌ای برای تهیه مدل سرعت نهایی ساخته می‌شود [۲]. از طرف دیگر با توجه به اینکه خصوصیات جنبشی انتشار امواج لرزه‌ای معمولاً تابعی غیرخطی از سرعت انتشار امواج هستند و حل این توابع در یک گام و به صورت معادله چند مجهولی قابل حل نیستند، لذا بیشتر روش‌های تهیه مدل سرعت، مبتنی بر تکرار هستند [۳]. بدین معنی که با به روزرسانی مدل سرعت اولیه در هر تکرار و اعمال محدودیت‌های لازم و احياناً یک مرحله خطی‌سازی، مدل سرعت نهایی انتشار موج در محیط به دست می‌آید. در انتها میزان هم‌خوانی داده‌های شبیه‌سازی شده در مدلسازی مستقیم از روی مدل سرعت نهایی با داده‌های مشاهده‌ای، می‌تواند به عنوان معیاری برای رد یا قبول مدل سرعت نهایی استفاده شود [۴]. از تفاوت‌های اساسی روش‌های مختلف تهیه مدل سرعت، انتخاب معیار پذیرش یا عدم پذیرش مدل سرعت نهایی است. اگرچه همه روش‌های تهیه مدل سرعت در گام اول بر اساس معیار هم‌خوانی با داده‌های لرزه‌ای استوار هستند، ولی این معیار به تنهایی قادر به تخمین دقت مدل سرعت نخواهد بود و صحت مدل باید توسط معیارهای دیگری نیز بررسی شود. در حالت کلی، روش‌های توموگرافی، ابزارهای بیشتر و دقیق‌تری به منظور ارزیابی هم‌خوانی مدل سرعت با داده‌ها در اختیار قرار می‌دهند و بنابراین مدل‌های سرعت نهایی، دارای صحت و دقت بیشتری خواهند بود [۵]. روش‌های ترکیبی مدل سرعت توموگرافی مبنی بر لایه و تفسیر

مختصات مکانی آنها شناسایی کرد. از نظر تئوری، نشانگرهای جنبشی میدان موج باید به نرمی در طول رخداد بازتابی تغییر کنند. بنابراین، پارامترهای داده مربوط به نقاطی که روی یک رخداد بازتابی مشترک واقع‌اند، الزاماً باید پیوستگی مشخصی از خود نشان دهند. در مرحله بعد، با استفاده از تکنیک دنبال کردن پرتو^۴ بر روی مدل سرعت اولیه، زمان سیر رخدادهای مدلسازی می‌شوند [۱۷].

تئوری پرتو، از جمله تئوری‌های پیچیده است که هندسه مسیر پرتو، شکست، بازتاب، پراش و تغییرات خواص پرتو را مورد بررسی قرار می‌دهد. تغییرات خواص پرتو و نحوه بازتاب آن می‌تواند به کمک ماتریس انتشار تشریح شود. ماتریس انتشار و یا ماتریس انتقال پرتو، ماتریسی است که به کمک آن مسیر حرکت پرتو از یک سطح به سطح دیگر آنالیز می‌شود. بدین ترتیب این فرایند را آنالیز ماتریس انتقال پرتو می‌گویند. این آنالیز خود نوعی تکنیک دنبال کردن پرتو است [۱۸]. این آنالیز شامل طراحی یک ماتریس انتشار است که سیستم نوری که پرتو در آن منتشر می‌شود، را تشریح می‌کند و با ضرب آن در بردار معرف پرتو، مسیر پرتو در سیستم، تعیین و دنبال می‌شود. در این آنالیز از تئوری پرتوهای موازی محور^۵ نیز استفاده می‌شود.

پرتوهای موازی محور به پرتوهایی اطلاق می‌شود که زاویه انحراف آنها (θ) و فاصله آنها (r) نسبت به پرتوی مرکزی ناچیز است. در مطالعات لرزه‌ای، پرتوی مورد نظر که میزان زمان سیر را برای آن محاسبه می‌شود، به عنوان محور نوری در نظر گرفته شده و به آن پرتوی مرکزی^۶ اطلاق می‌گردد و پرتوهای موازی محور نسبت به آن سنجیده می‌شوند. تکنیک دنبال کردن پرتو بر دو صفحه مرجع استوار است. این صفحات به نام صفحات آغازین^۷ و صفحات پایانی^۸ شناخته می‌شوند. منظور از صفحه آغازین صفحه‌ای است که پرتو از آن وارد محیط انتشار می‌شود و صفحه پایانی صفحه‌ای است که پرتو در آن از سیستم خارج می‌شود. اکنون تصور شود که پرتویی وارد محیط می‌شود. این پرتو در هنگام ورود از صفحه آغازین، دارای فاصله r و میزان انحراف θ_1 از محور نوری است. در کاربرد تئوری پرتو در مطالعات لرزه‌ای پارامترهای مذکور عبارت از بردار فاصله پرتوی موازی از پرتوی مرکزی (r) و بردار کندی^۹ پرتو (p) است. پس از تعیین هندسه مسیر پرتو؛

داده‌های ورودی روش‌های توموگرافی شبکه‌ای را تشکیل می‌دهند. لازم به توضیح است که محل نقاط دستچین شده بر روی مقطع، مستقل از یکدیگر هستند و نیازی به دستچین کردن پیوسته نقاط بر روی یک افق لرزه‌ای نیست. ولی این نقاط تا حد امکان باید بر روی رخدادهای واقعی قرار گیرند. عمل دستچین کردن را می‌توان مستقیماً روی مقطع دورافت صفر و یا بر روی مقطع همدوسی انجام داد. استفاده از مقطع همدوسی، امکان تشخیص مستقیم رخدادهای با همدوسی بالا را فراهم می‌کند. اگر در یک داده لرزه‌ای، چندگانه‌ها حذف شده باشند، عمل دستچین کردن نقاط داده ورودی برای انجام معکوس‌سازی توموگرافی را می‌توان با اطمینان بیشتری انجام داد. به این منظور، کفایت نقاطی که بر روی مقطع همدوسی دارای مقادیر بیشینه هستند را با در نظر گرفتن یک حد آستانه‌ای برای مقدار همدوسی و همچنین یک فاصله مکانی و زمانی بین نقاط، دستچین کرد. فاصله مکانی و زمانی نقاط دستچین شده به نحوه پارامتری کردن مدل سرعت یعنی به فاصله افقی و عمودی گره‌های بی‌اسپلین‌ها بستگی دارد. در جهت افقی باید حداقل دو نقطه روی رخداد بازتابی در فاصله بین دو گره متوالی وجود داشته باشد. این حالت را می‌توان به صورت یک قانون کلی نوشت که تعداد نقطه داده‌ها باید از تعداد پارامترهای مدل بیشتر باشد. در غیر این صورت، ضرایب وزنی مورد استفاده برای منظم‌سازی فرایند معکوس‌سازی باید طی هر تکرار افزایش یابند که موجب به وجود آمدن یک مدل سرعت تدریجی غیرواقعی می‌شود [۱۶].

هر چه تعداد نقاط داده بیشتر باشد، پایداری فرایند معکوس‌سازی بهبود می‌یابد، اما زمان محاسبه به صورت خطی با آن افزایش می‌یابد. در جهت محور زمان، فاصله کمینه بین نقاط دستچین شده، باید از طول سیگنال مربوط به یک رخداد لرزه‌ای بیشتر باشد. در این صورت اطمینان حاصل می‌شود که دو نقطه دستچین شده در یک مکان مشخص، در حقیقت مربوط به رخدادهای بازتابی مجزایی هستند. پس از انجام فرایند دستچین کردن نقاط باید صحت و دقت آنها بررسی شوند و در صورت نیاز اصلاح گردند. طی این مرحله اصلاح، نقاط داده غیر قابل اعتماد و همچنین نقاط که مربوط به بازتاب‌های چندگانه می‌شوند، شناسایی شده و حذف می‌گردند. این داده‌های غیرقابل اعتماد را می‌توان با رسم پارامترهای مختلف داده در برابر

که در آن (t_0, x_0) یک نمونه دورافت صفر که بر روی یک رخداد بازتابی مشخص شده، $\tau_0 = t_0/2$ زمان سیر پرتو نرمال، p مشتق مکانی اول آن (مولفه افقی بردار کندی) و ماتریس M مشتق مکانی دوم زمان سیر هستند. این فرایند با دستچین کردن خودکار نمونه‌های دورافت صفر (t_0, x_0) بر روی رخداد‌های بازتابی در مقاطع تصویر لرزه‌ای صورت می‌گیرد.

پارامترهای مدل را می‌توان به کمک موقعیت مکانی نقاط (x, z) و شیب محلی بازتابنده‌ها تعیین کرد. این کمیت‌ها را باید به عنوان پارامترهای اضافی مدل در نظر گرفت که طی فرایند معکوس‌سازی به همراه نحوه توزیع سرعت تعیین می‌شوند:

$$d_{data} = (x, y, z, e_x, e_y)_i \quad (2)$$

که در آن، x, y, z و مختصات مکانی و e_x و e_y مولفه‌های افقی بردار یکه هستند که این بردار به طور محلی بر بازتابنده عمود است. برای تعریف مدل سرعت تدریجی از مفهوم بی‌اسپلین‌ها استفاده می‌شود. برای تعریف مدل سرعت انتشار امواج لرزه ای در روش توموگرافی از توابع بی‌اسپلین استفاده می‌شود. توابع بی‌اسپلین درجه m توابع پایه‌ای اسپلین هستند که امکان نمایش هر اسپلین $V(x)$ از همان درجه را به صورت مجموع وزنی به صورت زیر فراهم می‌کند:

$$v(x) = \sum_i v_i \beta_i(x) \quad (3)$$

که در اینجا، v_i ضرایب بی‌اسپلین و $\beta_i(x)$ توابع پایه‌ای بی‌اسپلین هستند. روی یک توالی از گره‌ها، بی‌اسپلین‌ها معادل توابع اسپلین با طول کمینه هستند. لذا توابع بی‌اسپلین درجه m فقط روی $m+1$ بازه بین نقاط متوالی مقداری غیر صفر دارند. در روش توموگرافی دو بُعدی، یک مدل سرعت نرم با مشتق سوم پیوسته مورد نیاز است. بنابراین، بی‌اسپلین‌های درجه ۴ برای این منظور استفاده می‌شود، در حالی که از بی‌اسپلین‌های درجه ۳ برای توصیف مدل سرعت‌های یک بُعدی استفاده می‌شود. برای یک درجه ثابت m از صورت ساده شده نوشتاری بی‌اسپلین‌ها استفاده می‌شود.

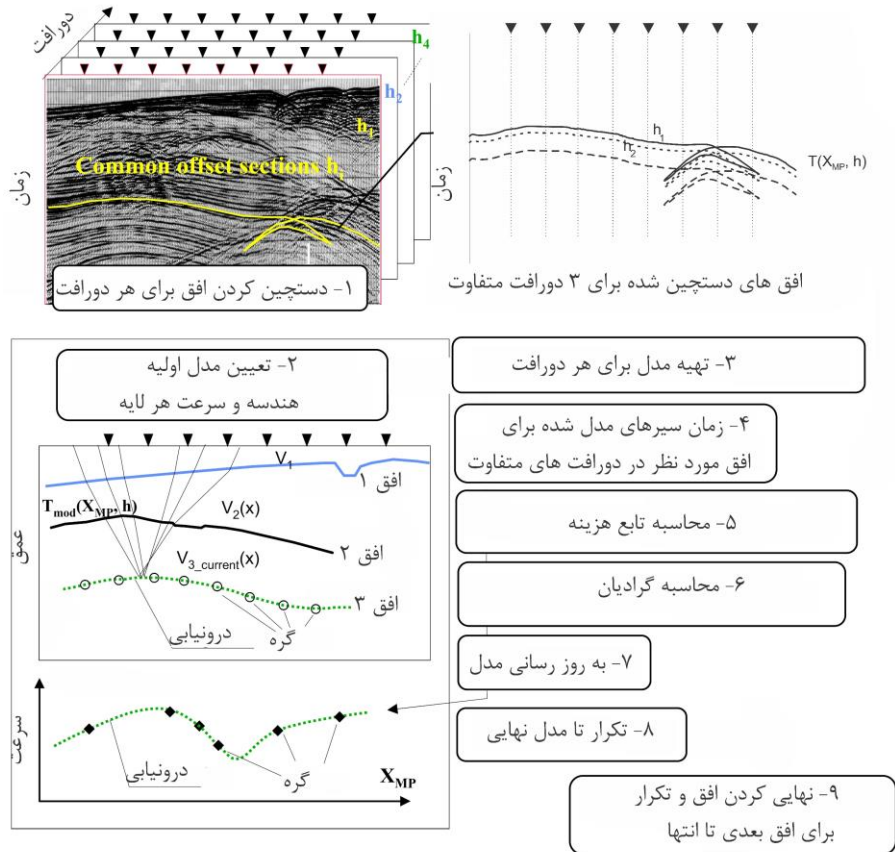
$$\beta_i(x) = \beta_{[x_i, \dots, x_{i+m-1}]_i}^{[m]} \quad (4)$$

زمان سیر مسیر پرتو باید تعیین شود. بدین منظور می‌توان از معادله آیکونال استفاده کرد.

معادله آیکونال یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی برای تعیین زمان سیر است. روش‌های حل این معادله به دو دسته روش‌های آنالیز مسیر پرتو و روش‌های جبری حل کننده معادله آیکونال تقسیم می‌شود. در روش اول معادله دیفرانسیل اصلی، توسط یکسری معادلات دیفرانسیل ساده‌تر جایگزین شده و در دستگاه مختصات ثابت حل می‌شوند که از آن به روش دنبال کردن مسیر پرتو جنبشی^{۱۰} یاد می‌شود. ولی در حالت دقیق سیستم مختصات می‌تواند با تغییر مسیر پرتو تغییر کند که در این صورت روش مذکور به عنوان دنبال کردن مسیر پرتو دینامیک^{۱۱} شناخته می‌شود [۱۹]. تغییر دستگاه مختصات در هر لحظه، محاسبات اضافه‌تری را نیز به دنبال خواهد داشت. به عنوان مثال ارزیابی ویژگی‌هایی محیط در این روش با دشواری روبرو است. چرا که اگر به دنبال تعیین ویژگی‌های محیط در هر نقطه دلخواه باشیم، نیاز به درونیایی خواهد داشت. این درونیایی باید به قدر کافی نرم باشد و اینچنین درونیایی‌هایی در محیط، در عمل زمان و حجم زیادی از محاسبات را به خود اختصاص می‌دهد. یکی دیگر از مشکلات، غیرخطی بودن معادله آیکونال است. حتی با شروع از یک شبکه منظم در شرایط اولیه، سیستم معادلات به سرعت ناپایدار خواهد شد. با توجه به روش حل انتخاب شده، این ناپایداری می‌تواند به صورت ارائه یک مقدار بسیار بزرگ و یا ارائه چند مقدار به جای یک مقدار خود را نشان دهد. اگر از روش مشخصه‌ها استفاده شود، ممکن است مساله چند جوابی رخ دهد. مساله چند جوابی از نظر فیزیکی معادل تا خوردن جبهه موج بر روی خودش است [۲۰]. برنامه‌های حل معادله آیکونال، معمولاً این چنین جواب‌های غیرقابل قبول را از خود ارائه نمی‌دهند. سپس با کمینه‌سازی اختلاف بین زمان سیرهای اندازه‌گیری شده و زمان سیرهای مدل‌سازی شده، می‌توان مدل اولیه را بهبود بخشید و پس از چند تکرار به یک مدل سرعت بهینه دست یافت. شکل ۱، روند تهیه مدل سرعت در روش توموگرافی شبکه‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای داده در روش‌های توموگرافی به صورت زیر تعیین می‌شوند [۲۱]:

$$d_{obs} = (\tau_0, M, p, x_0)_i, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n_{data}$$



شکل ۱: روند تهیه مدل سرعت در روش توموگرافی و دستچین کردن افق‌ها و به روز رسانی آنها

توصیف مدل سرعت انتشار امواج با استفاده از بی‌اسپلاین‌ها فقط بین بیشینه و کمینه محل گره‌ها صورت می‌گیرد؛ یعنی در خارج این محدوده، مقدار سرعت برابر صفر است. به منظور اطمینان از اینکه مدل سرعت به دست آمده از توموگرافی، معنی‌دار باشد، گره با طول بازه بسیار بزرگ، نسبت به گره‌های حاشیه مدل سرعت، در خارج محدوده‌ای که توسط داده‌ها تعیین می‌شود، قرار می‌دهند. در نتیجه، میزان سرعت برای این محدوده خارج از مدل ثابت می‌ماند. با استفاده از این توابع، اگر یک شبکه سه‌بُعدی تعریف شود که محل گره‌های این شبکه در جهت‌های مختلف، مطلقاً افزایشی باشد، مدل سرعت را می‌توان به کمک بی‌اسپلاین‌ها به صورت زیر نوشت [۲۲]:

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} \sum_{l=1}^{n_z} v_{jkl} \beta_j(x) \beta_k(y) \beta_l(-z) \quad (۴)$$

که $\beta_j(x)$ ، $\beta_k(y)$ و $\beta_l(-z)$ توابع پایه‌ای بی‌اسپلاین از درجه m و v_{jkl} ضرایب بی‌اسپلاین هستند. علامت منفی در این رابطه برای تاکید این امر که جهت مثبت z به سمت بالا است، معرفی شده است. فرایند

برای نمایش یک تابع یک‌بُعدی با تعداد n_x ضریب بی‌اسپلاین، به تعداد $n_x + m + 1$ گره نیاز است. در نتیجه، تابع داده شده در رابطه (۴) با ضرایب v_i ، که بر روی محل گره‌های $[x_1, \dots, x_{n_x}]$ تعریف می‌شوند، به $m+1$ گره اضافی نیاز دارد. لذا یک سری به صورت $[x_{-1}, \dots, x_{n_x+m-1}]$ تشکیل می‌شود. به منظور استفاده از این توابع برای توصیف مدل سرعت دو‌بُعدی، یک شبکه از گره‌ها با ابعاد $(n_x + m - 1) \times (n_z + m - 1)$ توسط دو سری اکیداً صعودی $[x_{-1}, \dots, x_{n_x+m-1}]$ و $[z_{-1}, \dots, z_{n_z+m-1}]$ تعریف می‌شوند. باید به خاطر داشت که جهت مثبت محور z به سمت بالاست. لذا افزایش عمق با افزایش مقدار $-z$ همراه است. به همین ترتیب سری $[z_{-1}, \dots, z_{n_z+m-1}]$ نیز با عمق مطلقاً صعودی است اگر $z_k > z_{k+1}$ باشد. در نتیجه، یک تابع سرعت دو‌بُعدی را می‌توان به صورت توابع بی‌اسپلاین به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$v(x, z) = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{ik} \beta_i(x) \beta_k(-z) \quad (۵)$$

داده‌های اضافی به مدل، به عنوان یک راهکار به منظور پایداری هرچه بیشتر مسئله معکوس‌سازی شناخته می‌شود [۲۴]. این داده‌ها می‌توانند به صورت یک مدل اولیه قابل اطمینان باشند که در طی حل مسئله معکوس‌سازی و در هر تکرار، بهبود می‌یابند. در این روش‌ها همچنین اگر نسبت سیگنال به نوفه در داده لرزه‌ای پایین باشد، مشخص کردن و دستچین کردن زمان‌سیرها به مشکل بر می‌خورد و یا حتی غیر ممکن می‌شود. نوع دیگر از محدودیت بر مدل سرعت در این روش از این فرض ناشی می‌شود که ساختار سرعت باید به طور محلی از ساختار بازتابنده، تبعیت کند [۲۵]. به عبارت دیگر، تغییرات سرعت باید اساساً در جهت عمود بر بازتابنده رخ دهد. تمام پارامترهای داده تحت تاثیر نوفه و یا مقدار مشخصی خطا در اندازه‌گیری قرار می‌گیرند. همچنین چون مقدار زمان سیر از روی یک سیگنال بازتابی با طول محدود و از روی داده لرزه‌ای تعیین می‌شود، بنابراین الزاماً تحت تاثیر مقداری خطا قرار می‌گیرد. لذا ممکن است پارامتر زمان سیر بازتابی، مقدار واقعی دقیق و صحیح را بیان نکند. ثابت در نظر گرفتن مقدار زمان سیر و پارامتر پرتو به معنی چشم پوشی خطاهای اندازه‌گیری از این کمیت‌ها است که ممکن است منجر به ناپایداری فرایند معکوس‌سازی شود [۲۶]. تمامی این معایب الزام می‌دارد که به دنبال تغییراتی در فرایند توموگرافی بیان شده بوده که بتوان از آن در تصویرسازی ساختارهای پیچیده استفاده کرد. همچنین سعی می‌شود که با فراهم کردن داده‌های اضافی به صورت یک مدل سرعت اولیه، علاوه بر پایدار کردن فرایند معکوس‌سازی توموگرافی و صرفه‌جویی در زمان، قابل اعتمادترین مدل سرعت نهایی را به دست آورد. روش معکوس‌سازی توموگرافی شبکه‌ای قابلیت بیشتری در رفع مشکلات بیان شده به منظور کاربرد در تصویرسازی ساختارهای پیچیده از خود نشان داده است [۲۷]. با این حال حضور لایه‌ها و یا محدوده‌های با آنومالی سرعت، باعث کاهش دقت تصویر لرزه‌ای می‌شود. بنابراین معمولاً در به روزرسانی کلی مدل سرعت در توموگرافی شبکه‌ای در مناطق با آنومالی سرعت، جواب‌های قابل قبولی به دست نخواهد آمد. چرا که مقادیر بسیار زیاد (و بعضاً بسیار پایین) سرعت در محدوده‌های آنومال، باعث انحراف مقادیر سرعت به دست آمده در محدوده‌های مجاور می‌شود. با این حال روش توموگرافی شبکه‌ای همچنان قادر به نشان دادن تغییرات شدید عمودی سرعت نبوده [۲۸] و

مدلسازی پارامترهای مشاهده‌ای، با استفاده از روش دنبال کردن پرتو صورت می‌گیرد. با در دست داشتن تعداد n_{data} نقطه داده، پارامترهای مشاهده‌ای به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$(\tau_0, M, p, x_0)_i^{obs}, \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, n_{data}$$

سپس با تهیه یک مدل از ساختار زمین‌شناسی زیر سطحی که با پارامترهای زیر مشخص می‌شود، بنابراین:

$$(x, y, z, e_x, e_y)_i \quad v_{jkl} \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, n_{data}$$

$$j = 1, \dots, n_x$$

$$k = 1, \dots, n_y$$

$$l = 1, \dots, n_z,$$

در ادامه با استفاده از مدلسازی مستقیم، سعی می‌شود پارامترهای مشاهده‌ای را از مدل جاری به دست آورد. همچنین پارامترهای مدلسازی شده به صورت رابطه (۹) نشان داده می‌شود:

$$\left(\tau_0, \underline{M}_{NIP}^{(\xi)}, \underline{p}^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{mod} \quad (9)$$

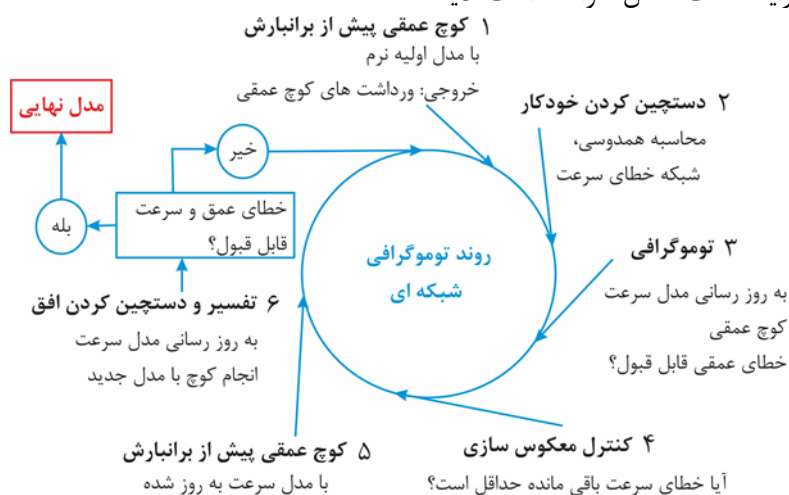
$$i = 1, \dots, n_{data}$$

در مرحله بعد، باید تفاوت میان این پارامترها و پارامترهای مشاهده‌ای کمینه شوند. هدف از کمینه‌سازی این تفاوت، بهبود پارامترهای مدل است. در یک مدل سرعت بهینه، تفاوت میان پارامترهای مدلسازی شده و پارامترهای مشاهده‌ای به کمتر از یک حد مشخص می‌رسند که این حد معمولاً توسط مفسر و در رابطه با نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های لرزه‌ای، الگوریتم مورد استفاده برای حل مسئله معکوس و سایر محدودیت‌ها، کنترل می‌شود [۲۳].

۳- روش توموگرافی هیبریدی

در روش‌های توموگرافی لایه‌ای و یا شبکه‌ای، علاوه بر محدودیت مشتقات دوم کمینه شده مدل سرعت، محدودیت‌های دیگری نیز جهت کاهش ابهامات مسئله معکوس‌سازی، بر روی مدل سرعت اعمال می‌شود. افزودن

با قید نرم، محدوده‌ای است که به مانند حالت قبل، همچنان دارای تباین سرعت بالا با محیط اطراف خود بوده، ولی مرزهای آن با محیط، چندان قطعیت ندارد. بدین ترتیب در فرایند به روزرسانی کلی، علاوه بر آنکه اجازه داده می‌شود که مقدار سرعت تغییر کند، مرز دو محیط نیز می‌تواند جابجا گردد. بدین معنی که نقاطی که در مرحله قبل از به روزرسانی به عنوان مرز لایه یا توده دستچین شده‌اند، بر خلاف قید سخت، الزاماً بیانگر مرز ثابتی نبوده و می‌توانند در فرایند به روزرسانی، جابجا شوند. این قید به ویژه برای ساختارهایی که در فرایند تصویرسازی اولیه، مرزهای مشخصی را نشان نمی‌دهند، قابل استفاده خواهد بود. شکل ۲ روند تهیه مدل سرعت به روش هیبریدی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: روند تهیه مدل سرعت به روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی در حوزه تصویرسازی عمقی پیش از برانبارش و دستچین کردن و به روزرسانی مدل به صورت افق به افق. (با تغییر [۲۲]).

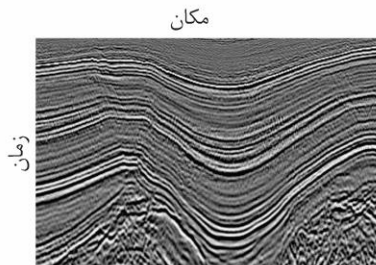
حدی غیر ممکن می‌سازد. در واقع مقدار سرعت در محدوده‌های آنومالی سرعت، به عنوان مثال گنبد نمکی، آنقدر زیاد است که در هنگام به روزرسانی در تکرارهای معکوس‌سازی مدل سرعت، یک انحراف ایجاد می‌کند. این مساله را می‌توان با ترکیب روش‌های توموگرافی شبکه‌ای و آنالیز سرعت لایه‌ای و کنترل میزان به روزرسانی در محدوده‌های از پیش انتخاب شده در مدل سرعت برطرف نمود. این دسته از روش‌ها به روش‌های هیبریدی شناخته می‌شوند. چگونگی عملکرد روش پیشنهادی در ادامه لازم است که به کمک یکی از روش‌های تصویرسازی مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر نیست که کاهش دقت مدل سرعت به دست آمده از روش توموگرافی در حضور آنومالی سرعت، تاثیر مخربی بر تصویر نهایی به دست آمده چه از

همچنین لایه‌ها و یا توده‌هایی که دارای سرعت ثابت ولی تباین بالایی با محیط اطراف خود هستند را نیز با خطای بسیار بالا به تصویر می‌کشد [۲۹]. به منظور برطرف کردن مساله تباین سرعت در روش توموگرافی شبکه‌ای، دو نوع محدودیت یا قید لایه‌ای در فرایند توموگرافی لحاظ می‌شود، قید سخت و قید نرم [۳۰]. در فرایند توموگرافی هیبریدی، یک لایه با قید سخت، به عنوان مثال مرز کف دریا، کانال‌های پرشده سطحی، محدوده‌های گنبد نمکی و یا لایه گچی پرسرعت، در به روزرسانی‌های مدل سرعت در محدوده بالای لایه سخت، اجازه تغییر نخواهند داشت. بدین ترتیب فرایند توموگرافی شبکه‌ای، در مرحله به روزرسانی کلی، تبدیل به یک فرایند غیر کلی لایه به لایه (با حفظ مزایای توموگرافی شبکه‌ای) می‌شود. برای یک لایه با قید نرم، این شرایط حالت عکس خواهد داشت. لایه

با توجه به اینکه مرزها و گره‌های انتخاب شده بر روی داده‌های پیش از برانبارش انتخاب می‌شوند، لذا این فرایند بسیار پر هزینه و زمان‌بر بوده، علاوه بر اینکه در داده‌های با نسبت سیگنال به نوفه پایین و یا داده‌هایی که تشخیص افق‌ها و مرز ساختارها در آنها بسیار دشوار است، ممکن است به جواب نهایی همگرا نشود. بدین منظور در این پژوهش، تغییراتی بر روی روند مدل هیبریدی به منظور کاهش زمان پردازش صورت گرفت. بدین ترتیب هدف مورد نظر در پژوهش پیش رو، برطرف کردن معضل به روزرسانی مدل سرعت در روش توموگرافی در شرایط وجود آنومالی‌های سرعت است. حضور آنومالی سرعت در فرایند توموگرافی دست یافتن به مقدار واقعی سرعت در زون‌های اطراف آنومالی سرعت را در تکرارهای به روزرسانی کلی^{۱۲} تا

روزرسانی را به صورت افق به افق انجام می‌دهد، می‌توان مرزهای سخت و نرم را هم‌زمان به مدل معرفی کرد. با توجه به اینکه مرزهای سخت فرایند به روزرسانی در محدوده‌های متفاوت مدل را از یکدیگر مستقل می‌کند، لذا نیازی به معرفی مرزها به صورت مرحله‌ای نیست. چرا که اصل مرحله‌ای معرفی کردن افق‌ها در گام‌های به روزرسانی توموگرافی، جلوگیری از انتقال خطای تخمین سرعت به افق‌های پایین‌تر و جلوگیری از انباشته شدن خطای سرعت برای افق‌های بسیار پایین‌تر است. در فرایند هیبریدی، این وظیفه بر عهده مرزهای سخت و نرم قرار دارد. بدین ترتیب می‌توان ضمن کاهش بسیار زیاد زمان پردازش، تصویرسازی در حوزه عمق را با کمترین خطا انجام داد. روند پیشنهادی در این پژوهش، در شکل ۳ نشان داده شده است.

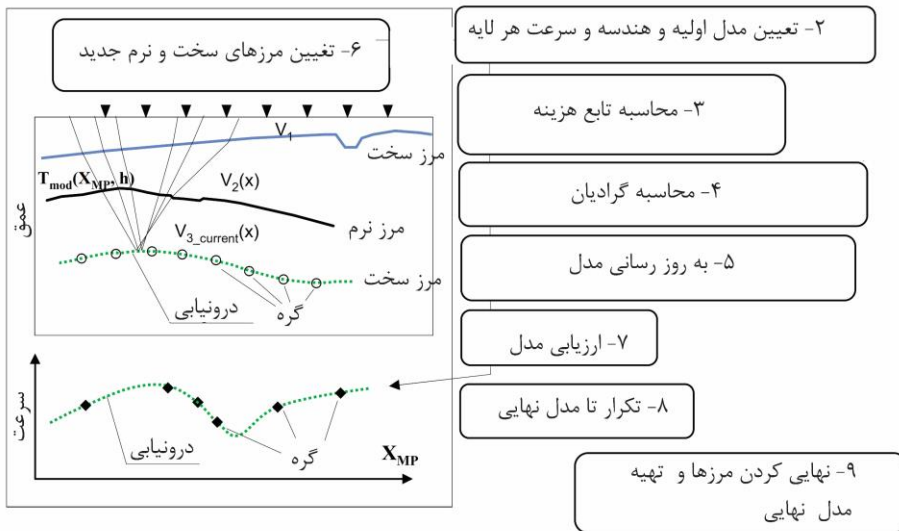
روش‌های تصویرسازی پرتو مینا و چه از روش‌های برون‌یابی میدان موج خواهد داشت. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به بررسی هزینه روش‌های موجود، روش تصویرسازی پرتو مینا به دلیل سادگی انجام فرایند و دارا بودن مشکلات کمتر در فرایند تصویرسازی انتخاب گردید. در اولین گام، تصویرسازی لرزه‌ای از حوزه پیش از برانبارش به حوزه پس از برانبارش انتقال داده شد. در این صورت اگر شرایط مورد نظر در تصویرسازی ایجاد نگردید، می‌توان تصویرسازی پیش از برانبارش را جایگزین نمود. البته این تغییر چندان جدی نبوده و روش حل مساله را تغییر نمی‌دهد. به منظور کاهش زمان پردازش در این روش، بر خلاف روش توموگرافی شکل ۱ که از آن در فرایند توموگرافی هیبریدی (شکل ۲) نیز استفاده می‌شود و به



۱- تعیین کردن مرزهای سخت و نرم



مدل کردن مرزهای سخت و تعیین مقدار سرعت اولیه



شکل ۳: روند پیشنهادی تهیه مدل سرعت و تغییر در روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی، انتقال آن از حوزه تصویرسازی عمقی پیش از برانبارش به پس از برانبارش و معرفی همه مرزها و افق‌های سخت و نرم در یک مرحله به مدل

سرعت مدنظر خواهد بود و در بخش دوم کنترل کارآمدی استراتژی پیشنهادی با روش‌های پرتو مینا و یا روش‌های برون‌یابی میدان موج. معمولاً استفاده از روش‌های پرتو مینا برای ساختارهای ساده‌تر که رسیدن سریع به یک جواب کلی اهمیت بیشتری دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در

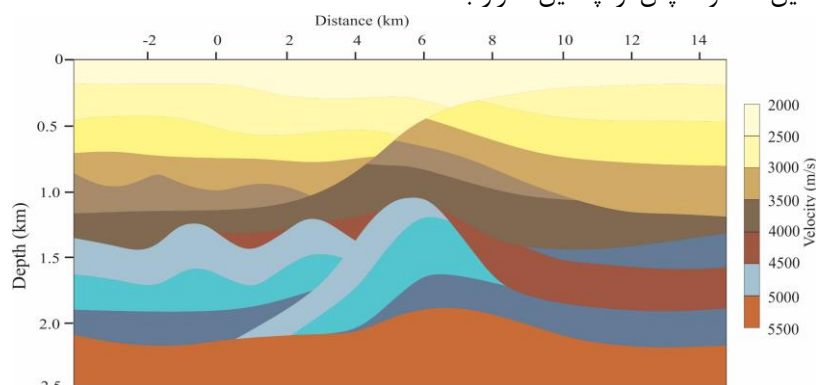
لازم به ذکر است که در انتخاب روش‌های پرتو مینا، عدم توانایی احتمالی این روش‌ها در تصویرسازی موفق ساختارهای پیچیده باید مدنظر قرار گیرد. لذا پژوهش پیش رو را می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم کرد که در بخش اول برطرف کردن مشکل توموگرافی در حضور آنومالی

این پژوهش با توجه به بررسی هزینه روش‌های موجود، روش‌های پرتو مبنا به دلیل سادگی انجام فرایند و دارا بودن مشکلات کمتر در فرایند تصویرسازی انتخاب گردید. لازم به ذکر است که پرتوهای برگشتی^{۱۳}، چندگانه و منشوری^{۱۴} در رابطه با معتبر بودن شرایط تصویرسازی مشکلاتی را ایجاد می‌کنند. در بیشتر موارد لازم است که در ابتدا در مراحل پیش پردازش، چندگانه‌ها در داده حذف شوند. همچنین در رابطه با امواج و یا پرتوهای برگشتی، روش‌های پرتو مبنا اگر نتوانند در حین جداسازی (تشخیص) امواج پایین رونده و بالارونده را تفکیک کنند، در مرحله همبستگی متقاطع مشکل ایجاد خواهند کرد. امواج منشوری اگر با مشخصات شکل موج در دسته‌بندی‌های متفاوت داده، شناسایی و حذف نشوند (مانند دامنه متفاوت در طول پرتو در حوزه برداشت زاویه^{۱۵}) در آن صورت همگی آنها در طول تصویرسازی وجود داشته و ایجاد تصویری ضعیف را خواهند کرد [۳۱]. لازم به ذکر است که مسلماً تنها تفکیک بخش‌هایی در مدل سرعت به نام محدوده نرم و محدوده سخت، همگی مزایای کاهش زمان پردازش و افزایش دقت را یکجا در حد اعلا خود به همراه نخواهد داشت. در رابطه با زمان پردازش، باید عنوان شود که چون ارتباط محدوده سخت، که محدوده آنومالی سرعت است، با محدوده‌های نرم عملاً توسط مرزها تفکیک شده، لذا با تعداد تکرارهای کمتری به جواب نهایی در این محدوده دست خواهیم یافت. چرا که در تکرارهای به روزرسانی، محدوده‌های با سرعت کمتر دخالتی در به روزرسانی محدوده سخت ندارند و عملاً نام محدوده سخت بدین دلیل به آن اطلاق می‌گردد که در واقع خیلی سخت مقادیر آن در هر تکرار، تغییرات زیاد را تجربه خواهد کرد. لذا این محدوده پس از چندین تکرار به

مقدار نهایی خود خواهد رسید. این مساله همچنین بر روی محدوده‌های نرم نیز چنین تاثیری را خواهد داشت. چرا که عملاً اجازه دخالت مقادیر بالای سرعت مربوط به محدوده سخت را در به روزرسانی محدوده‌های نرم در فرایند به روزرسانی کلی مدل نمی‌دهد و لذا این محدوده‌ها نیز عملاً با تعداد تکرارهای کمتری به جواب نهایی خواهند رسید. البته در نتایج میانی (همان‌گونه که انتظار می‌رفت) محدوده‌های سخت سریع‌تر به جواب نهایی رسیده و در تکرارهای بعدی تغییر نخواهد کرد و منتظر رسیدن به جواب نهایی در محدوده‌های نرم خواهد ماند. بنابراین زمان پردازش به مقدار قابل قبولی از این باب کاسته خواهد شد. در استراتژی پیشنهادی کاهش خطا از این باب صورت خواهد گرفت که چون اجازه دخالت مقادیر سرعت خیلی کم و خیلی زیاد در به روزرسانی کلی مدل گرفته می‌شود، و این مقادیر آنومالی جدای از سایر مقادیر به روزرسانی خواهند شد، لذا مقدار نهایی سرعت در محدوده‌های نزدیک این تغییرات یا محدوده‌های بینابینی در تغییرات سرعت، از این تاثیر مصون بوده و مقادیر آن به مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهند شد. طبیعتاً انتظار تغییر در مقادیر سرعت دورتر از محدوده‌های آنومالی به روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی نمی‌رود. ولی باید در نظر داشت که این تغییرات، چشم‌گیر نخواهد بود.

۴- تهیه مدل سرعت در داده مصنوعی

به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، در این بخش از یک مدل مصنوعی گنبدی شکل استفاده می‌شود. مدل بلوکی داده‌های مورد استفاده شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: مدل بلوکی گنبدی شکل با سطح توپوگرافی صاف. سرعت موج طولی در هر لایه ثابت است

این مدل شامل لایه‌های همگن با سرعت موج طولی بین ۲ تا ۵ کیلومتر بر ثانیه است. چگالی لایه‌ها نیز در مدل تغییر می‌کند که در این شکل نشان داده نشده است. دقت شود که محورهای x و z با مقیاس متفاوت نشان داده شده‌اند. دسته داده‌های دارای هم‌پوشانی (قبل از برانبارش) و داده‌های دورافت صفر (بعد از برانبارش) در مدل به کمک تکنیک دنبال کردن پرتو تهیه شد. لازم به ذکر است که مدل اصلی تهیه شده در سطح دارای توپوگرافی نامنظم بوده و در اینجا برای سادگی کار بخش بالایی مدل بریده شده و توپوگرافی به صورت مسطح در نظر گرفته شده است. برای تهیه مدل گنبدی شکل، فاصله بین نقاط انفجاری ۱۰ متر در نظر گرفته شد. در دسته داده‌های دارای هم‌پوشانی، فاصله بین گروه گیرنده‌ها ۲۰ متر و بیشینه دورافت برابر ۲۰۰۰ متر بوده که در نهایت تعداد

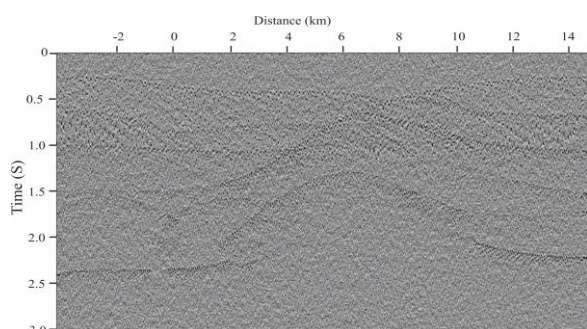
جدول ۱: پارامترهای هندسی مربوط به برداشت داده‌های مصنوعی مدل گنبدی شکل

هندسه نقطه میانی و دورافت	
تعداد شبکه CMP	۱۲۵۰
حداکثر چینش CMP	۴۷
فاصله بین شبکه CMP	۳۲ متر
بازه دورافت	۰ تا ۲۰۰۰ متر

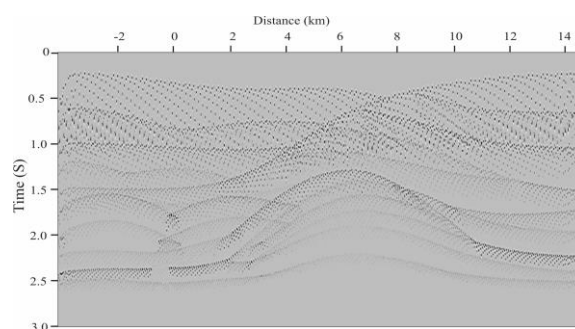
هندسه چشمه و گیرنده	
تعداد چشمه‌ها	۷۵۰
فاصله چشمه‌ها	۱۰ متر
تعداد گیرنده‌ها	۳۰۰
فاصله گیرنده‌ها	۲۰ متر

محتوای فرکانس	
فرکانس غالب	۲۰ هرتز
حداکثر فرکانس	۴۰ هرتز

پارامترهای ثبت	
زمان ثبت	۳ ثانیه
فاصله نمونه برداری	۴ میلی ثانیه



ب



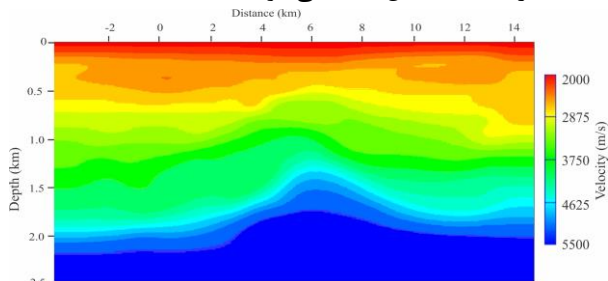
الف

شکل ۵: الف) دسته داده‌های قبل از برانبارش در برداشت‌های انفجاری در داده مصنوعی مدل گنبدی شکل بدون نوفه و ب) دسته داده‌های پیش از برانبارش پس از اضافه کردن نوفه اتفاقی

مدل ساده چند لایه‌ای کفایت می‌کند، چرا که در فرایند توموگرافی، پس از چندین بار به روزرسانی، به مدل نهایی نزدیک خواهد شد. البته دلیل اصلی ساده‌تر گرفتن مدل اولیه سرعت در این روش، حل گام به گام مساله از ساده به

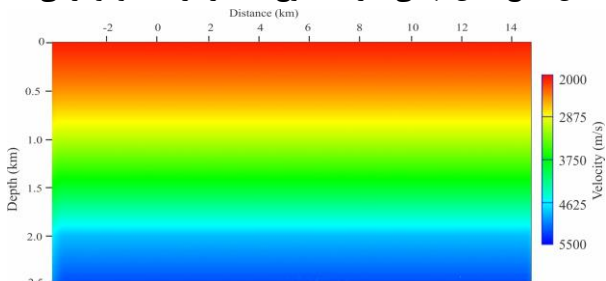
شکل ۶-الف) مدل سرعت اولیه به منظور انجام توموگرافی معمول و شکل ۶-ب) مدل اولیه جهت انجام فرایند توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود، برای روش معمول توموگرافی یک

معمول به دست آمده و شکل ۶-د مدل سرعت نهایی به دست آمده به روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود، روند کلی هر دو مدل سرعت یکسان است، ولی تفاوت‌هایی در محدوده‌های ساختار گنبدی شکل دیده می‌شود.

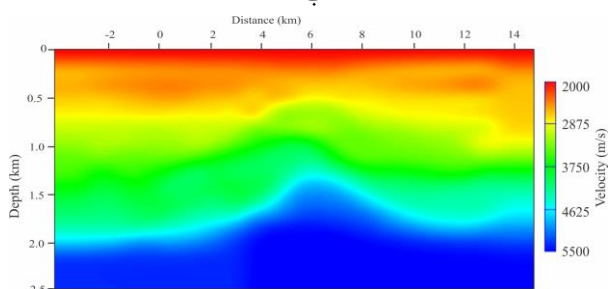


ب

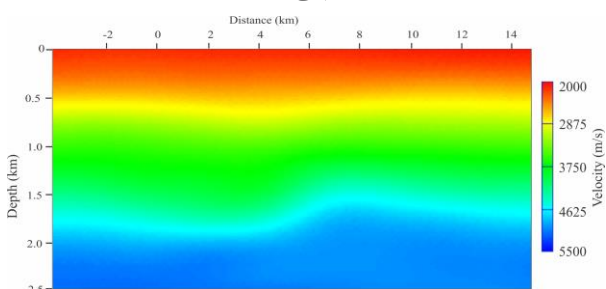
دشوار است، چرا که عملاً با انتخاب یک مدل پیچیده به عنوان مدل اولیه در توموگرافی معمول، به حل معادلات پیچیده‌تری در گام‌های ابتدایی نیاز است که این مساله در برخی موارد رسیدن به جواب صحیح را دشوار می‌سازد. شکل ۶-ج مدل نهایی سرعت کوچک که در فرایند توموگرافی



الف



د



ج

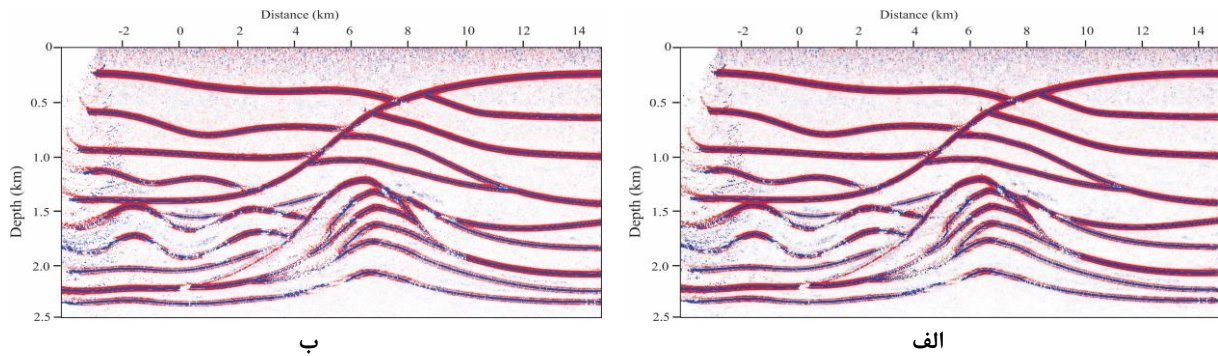
شکل ۶: الف) مدل اولیه سرعت جهت انجام فرایند توموگرافی معمول، ب) مدل اولیه سرعت جهت انجام فرایند توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی، ج) مدل نهایی سرعت به دست آمده به روش توموگرافی معمول و د) مدل نهایی سرعت به دست آمده به روش توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی

شبکه‌ای هیبریدی به خوبی حفظ شده‌اند. در محل‌هایی که بازتابنده حالت منحنی شکل به خود گرفته مانند محل ناودیس‌ها و یا گوشه‌های گنبد، تصویر لرزه‌ای با استفاده از مدل سرعت توموگرافی معمول تصویر مناسبی از خود ارائه نداده در حالی که این بازتابنده‌ها در تصویر لرزه‌ای به دست آمده به کمک مدل سرعت توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی به خوبی آشکار شده‌اند.

۵- تهیه مدل سرعت در داده واقعی

به منظور بررسی عملکرد روند پیشنهادی در مدلسازی هیبریدی، فرایند نشان داده شده در شکل ۳ بر روی داده‌های واقعی نیز پیاده گردید. این داده دارای ۹۱۶ عدد چشمه با فاصله میان چشمه‌ای ۲۰ متر و همچنین دارای ۳۶۲ عدد گیرنده با فاصله میان گیرنده‌ای ۲۰ متر است. نرخ نمونه برداری آن ۴ میلی‌ثانیه و محدوده دورافت آن صفر تا ۳۷۸۰ متر است. مشخصات داده مورد نظر در جدول ۲ بیان شده است.

پس از تهیه مدل سرعت نهایی به هر دو روش توموگرافی معمول و توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی، اکنون می‌توان تصویرسازی لرزه‌ای به روش تئوری پرتو را بر روی داده لرزه‌ای پیش پردازش شده به کمک هر دو مدل سرعت انجام داد. شکل ۷-الف نتیجه انجام فرایند تصویرسازی با استفاده از مدل سرعت به دست آمده به روش معمول را نشان می‌دهد. نتیجه تصویرسازی با استفاده از مدل سرعت توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی در شکل ۷-ب نشان داده شده است. همان گونه که در هر دو تصویر لرزه‌ای مشاهده می‌شود، علاوه بر آنکه رخداد‌های بازتابی به خوبی تصویر شده‌اند، امتداد بازتابنده‌ها به خوبی حفظ شده و یال‌های ساختارهای پرشیب به خوبی به تصویر در آمده‌اند. رخداد‌های زیر گنبد نمکی به دلیل حضور کم انرژی در آن منطقه، هنوز به خوبی تصویر نشده‌اند. قسمت سفید رنگ در سمت چپ بالای مقطع نیز به دلیل کمبود انرژی در آن محل است. پیوستگی بازتابنده‌ها در تصویر لرزه‌ای به دست آمده با استفاده از مدل سرعت توموگرافی



شکل ۷: الف) تصویر لرزه‌ای به دست آمده با استفاده از مدل سرعت توموگرافی معمول و ب) تصویر لرزه‌ای به دست آمده با استفاده از مدل سرعت توموگرافی شبکه‌ای هیبریدی

جدول ۲: پارامترهای هندسه برداشت داده واقعی مورد استفاده در این پژوهش

هندسه نقطه میانی و دورافت	
تعداد شبکه CMP	۴۱۰۰
حداکثر چینش CMP	۶۰
فاصله بین شبکه CMP	۱۰ متر
بازه دورافت	۴۵۰۰-۵۰ متر

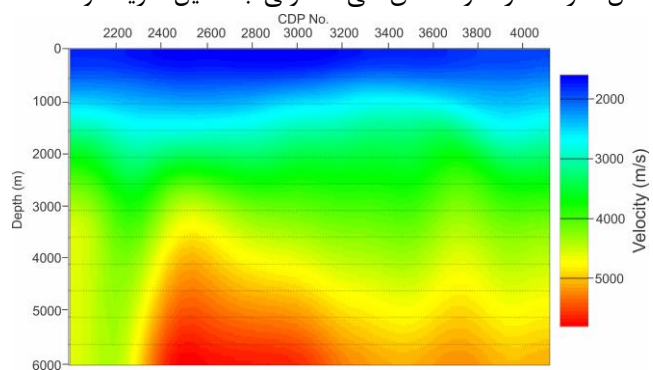
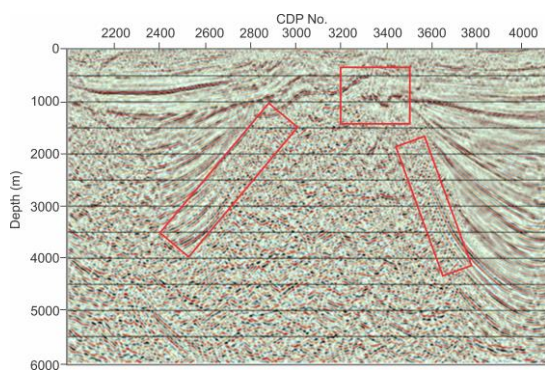
هندسه چشمه و گیرنده	
تعداد چشمه‌ها	۹۱۶
فاصله چشمه‌ها	۶۰ متر
تعداد گیرنده‌ها	۳۶۲
فاصله گیرنده‌ها	۲۰ متر

محتوای فرکانس	
فرکانس غالب	۸ تا ۹۰ هرتز
حداکثر فرکانس	۴۰ هرتز

پارامترهای ثبت	
زمان ثبت	۶ ثانیه
فاصله نمونه برداری	۲ میلی ثانیه

زمان پردازش بالای این روش در این پژوهش، از کوچ عمقی پس از برانبارش استفاده گردید. البته به دلیل اینکه تصویرسازی در هر صورت در حوزه عمق انجام می‌گیرد، از تاثیر پذیری تصویر لرزه‌ای از مدل سرعت کاسته خواهد شد. مدل سرعت کوچ و مقطع کوچ عمقی پس از برانبارش در شکل ۸ نشان داده شده است.

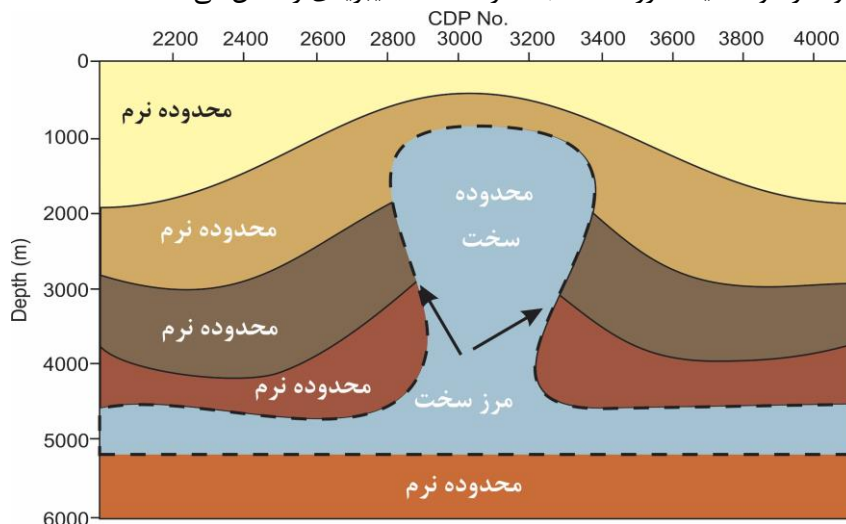
بدین منظور در ابتدا داده‌ها تحت پیش پردازش‌های لازم قرار گرفت و مدل سرعت اولیه (مدل سرعت برانبارش) برای داده‌ها به دست آمد. سپس مدل اولیه سرعت به مدل بین لایه‌ای تبدیل و اولین تصویر لرزه‌ای از منطقه در فرایند کوچ عمقی پس از برانبارش تهیه گردید. اگر چه کوچ عمقی پیش از برانبارش حساسیت بیشتری نسبت به مدل سرعت از خود نشان می‌دهد، ولی به دلیل هزینه و



شکل ۸: الف) مدل سرعت کوچ مورد استفاده در تصویرسازی به روش کوچ عمقی پس از برانبارش. ب) تصویر کوچ عمقی پس از برانبارش از داده‌های واقعی. مستطیل‌های قرمز رنگ، بخش‌های با بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد.

به گونه‌ایی که فرایند به روزرسانی محدوده بالای ناپیوستگی، که دارای حالت لایه‌ای منظم و ساده است، مستقل از فرایند به روزرسانی محدوده زیر گنبد نمکی با ساختار پیچیده باشد. در رابطه با محدوده زیر ناپیوستگی، مرز گنبد نمکی باید به عنوان مرز نرم انتخاب شود. اگر چه انتخاب مرزهای عوارض ساختمانی بر روی مدل سرعت اولیه چندان دقیق نیست، با این حال این مرزها در به روزرسانی مدل سرعت هیبریدی و با برقراری شروط تصویرسازی، به روز شده و محل آنها تغییر خواهد کرد. شرط مورد نظر در این بخش، انطباق زمانی میدان موج شبیه‌سازی شده از چشمه تا نقطه مورد نظر بر روی بازتابنده و میدان موج شبیه‌سازی شده از گیرنده تا نقطه مورد نظر است. شکل ۹ محدوده‌های نرم و سخت انتخاب شده به عنوان مدل اولیه فرایند تهیه مدل سرعت به روش هیبریدی را نشان می‌دهد.

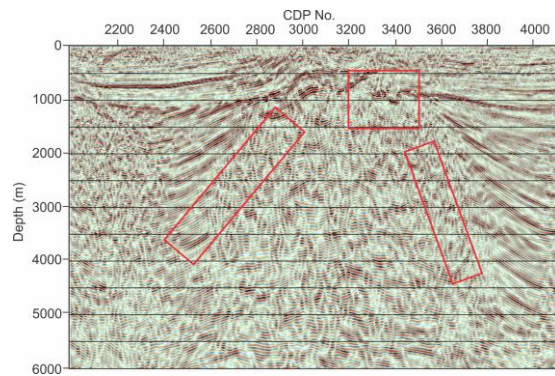
همانگونه که دیده می‌شود، مرزهای گنبد نمکی واضح نبوده و محل قطع شدگی بازتابنده‌ها در نقطه تلاقی با بدنه گنبد نمکی، قابل شناسایی نیستند. همچنین گسل خوردگی موجود در بالای گنبد نمکی و مرزهای کانال سطحی پر شده در کنار گسل نیز چندان آشکار هستند. افزایش کیفیت تصویر لرزه‌ای در این موارد تحت تاثیر دقت و صحت مدل سرعت مورد استفاده است. بدین منظور از روش هیبریدی در تهیه مدل سرعت لرزه‌ای استفاده گردید. با توجه به هدف تصویرسازی لرزه‌ای در این منطقه که به تصویر کشیدن مرزهای گنبد نمکی، گسل‌ها، کانال پر شده و ناپیوستگی است، لذا در گام اول باید محدوده‌های نرم و سخت در فرایند توموگرافی در مرحله به روزرسانی، مشخص شوند. با توجه به اینکه محدوده بالا و زیرین ناپیوستگی، دو منطقه جداگانه را به نمایش می‌گذارند، لذا می‌توان این دو محدوده را توسط یک مرز سخت جدا کرد.



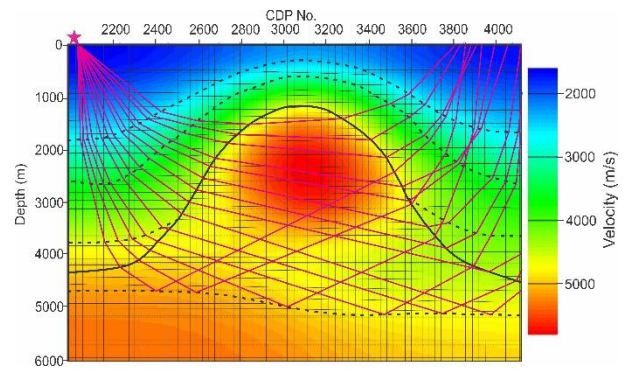
شکل ۹: تعیین محدوده‌های نرم و سخت به کمک تصویر لرزه‌ای و مدل سرعت اولیه

محدوده‌هایی از مدل اولیه سرعت تعیین گردیدند که تغییرات سرعت قائم وجود داشت و مرز سخت دور تا دور محدوده آنومالی سرعت با نیم نگاهی به هندسه احتمالی گنبد نمکی ترسیم گردید. با توجه به اینکه در فرایند کوچ عمقی از تکنیک ردیابی پرتو استفاده می‌شود، لذا اضافه کردن چند درجه همواری به مدل سرعت اولیه، ضروری است. به منظور بهتر دنبال کردن تغییرات تصویر لرزه‌ای در فرایند توموگرافی هیبریدی، تصویر لرزه‌ای حاصل از مدل سرعت اولیه هموار شده در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که مدل نشان داده شده در شکل ۹ تنها یک شکل مفهومی از ساختاری است که در مدل نهایی باید انتظار داشت. در واقع شکل ۹ تنها برای نشان دادن مفهوم محدوده‌های نرم و سخت در یک مدل اولیه سرعت در حضور یک توده نمکی و لایه‌های بالا کشیده اطراف آن است. مدل اولیه‌ای که در فرایند توموگرافی مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۱۰-الف نشان داده شده و مرزهای محدوده‌های نرم با خط چین و مرزهای محدوده سخت با خط مشکی پررنگ بر روی مشخص شده‌اند. همان گونه که دیده می‌شود، این مرزها بسیار ساده‌تر از آن چیزی است که در شکل ۹ نشان داده شده و در واقع مرزهای نرم در



ب



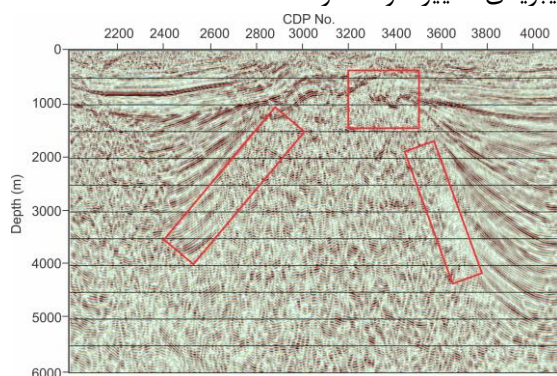
الف

شکل ۱۰: الف) مدل سرعت اولیه که پس از چندین تکرار در فرایند توموگرافی به دست آمده و نمونه‌ای از مسیر پرتوها در به روزرسانی مدل و ب) تصویر لرزه‌ای به دست آمده توسط این مدل سرعت. مستطیل‌های قرمز رنگ، بخش‌های با بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد

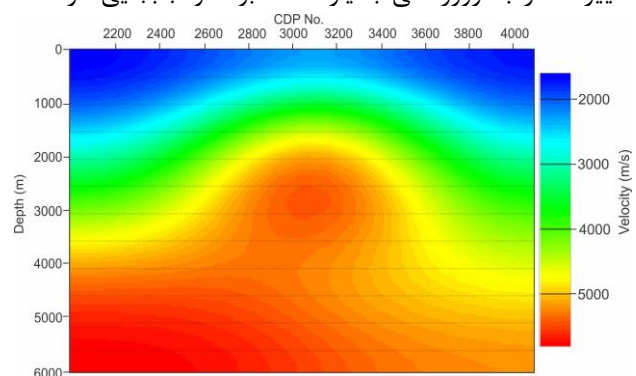
همان گونه که در شکل ۱۰-ب دیده می‌شود، مرزها چندان دقیق نبوده و کیفیت تصویر لرزه‌ای افزایش چندانی نداشته، که چنین انتظاری نیز از مدل سرعت اولیه نمی‌رود. در ادامه فرایند به روزرسانی هیبریدی مدل اولیه انجام گرفته و به روزرسانی کلی با در نظر گرفتن شرایط بیان شده انجام می‌گیرد.

شکل ۱۱-الف نتیجه چندین تکرار در به روز رسانی مدل سرعت به روش توموگرافی هیبریدی را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود، در محدوده بالایی مقطع، تغییرات در به روزرسانی بسیار اندک بوده و جایجایی در

مرزها دیده نمی‌شود. این مساله ناشی از در نظر گرفتن این محدوده به عنوان محدوده سخت بود که مرز بین سرعت‌ها را تغییر نداده و تنها تغییر اندکی در سرعت ایجاد می‌کند. در عین حال چگونگی به روزرسانی در این محدوده، تاثیری در تغییر مرزها و مقادیر سرعت در به روزرسانی محدوده‌های دیگر نخواهد داشت. در اطراف گنبد نمکی، مقادیر سرعت در محدوده سخت تغییری نکرده، در حالی که مرز پایین گنبد نمکی که به دلیل عدم تصویرسازی مناسب به عنوان مرز نرم تعریف شده بود، در به روزرسانی هیبریدی، تغییر خواهد کرد.



ب



الف

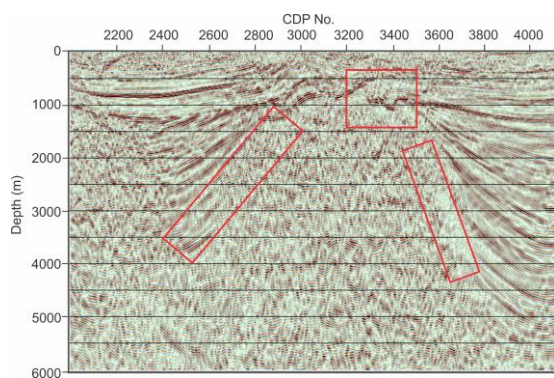
شکل ۱۱: الف) مدل سرعت به روز شده پس از چندین تکرار در فرایند توموگرافی هیبریدی با الگوریتم پیشنهادی و ب) تصویر لرزه‌ای به دست آمده از مدل سرعت در این مرحله. مستطیل‌های قرمز رنگ، بخش‌های با بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱-ب تصویر لرزه‌ای بدست آمده به کمک مدل سرعت شکل ۱۱-الف را نشان می‌دهد. اگرچه انتظار نمی‌رود که مشکلات تصویرسازی در مرحله قبل کاملاً بر طرف گردد، با این حال قدری بهبود در حاشیه‌های گنبد نمکی و ساختارهای نزدیک سطح دیده می‌شود. در این داده با توجه به پیش پردازش‌های انجام شده، چندگانه‌ها پیش از این به روش تبدیل رادون حذف گردیدند. امواج

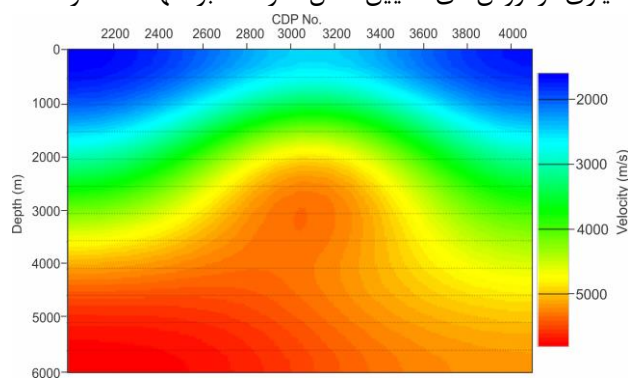
برگشتی نیز به دلیل هندسه ساده گنبد نمکی در داده به مقداری نبود که بر روی کیفیت تصویر تاثیرگذار باشد. امواج منشوری نیز به دلیل عدم وجود ناودیس‌های خیلی بسته در ساختار زیر سطحی، در داده وجود نداشته است. در ادامه روند روش هیبریدی، مرزها به روز رسانی شده، مرزهای سخت و نرم باز تعریف شده و تکرارهای توموگرافی انجام می‌گردد. این فرایند تا زمانی که مفسر تشخیص دهد،

پیش از این به روش تبدیل رادون حذف گردیدند. امواج

است. با توجه به اینکه انتظار می‌رود امکان بهبود تصویر لرزه‌ای وجود داشته باشد، لذا مرزها مجدداً تعریف شده و کل فرایند توموگرافی تکرار می‌شود. شکل ۱۲-الف مدل نهایی سرعت به دست آمده را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود، این مدل، هیبریدی از مدل لایه‌ای در بالا و توموگرافی در پایین است. شکل ۱۲-ب تصویر لرزه‌ای به دست آمده از این مدل سرعت را نشان می‌دهد.



ب

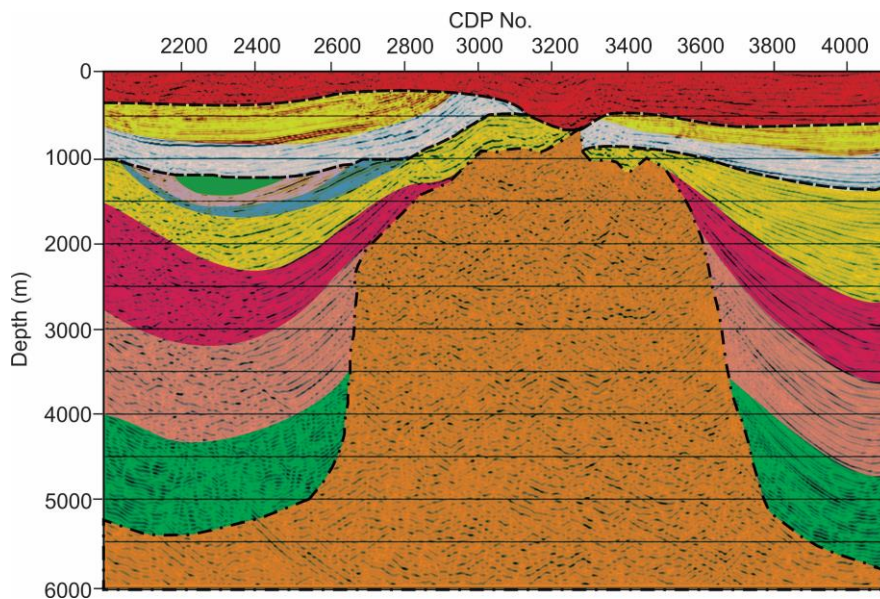


الف

شکل ۱۲: الف) مدل نهایی سرعت به دست آمده پس از چندین تکرار در فرایند توموگرافی هیبریدی با الگوریتم پیشنهادی و ب) تصویر لرزه‌ای نهایی به دست آمده از مدل سرعت نهایی. مستطیل‌های قرمز رنگ، بخش‌های با بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد

ساختار هندسی زمین‌شناسی ایجاد شود، بخش بزرگی از هدف پژوهش حاصل شده است. بدین منظور لازم است که مدل سرعتی که در روش معمول کوچک استفاده می‌شود (شکل ۸-الف) با مدل سرعت حاصل از استراتژی مورد نظر (شکل ۱۲-الف) مقایسه گردد. در روش‌های معمول تهیه مدل سرعت، سعی می‌شود که در فرایند آنالیز سرعت کوچک^{۱۶}، مدل سرعت به گونه‌ای حاصل شود که بهترین تصویر لرزه‌ای را به دست دهد و الزامی به همخوانی ساختاری با تصویر ندارد و تنها همخوانی آن با افقی کردن بازتابنده‌ها در ورداشته‌های تصویری مشترک^{۱۷} ارزیابی می‌شود. همچنین در این روش‌ها، معمولاً اجازه معکوس شدن روند افزایشی سرعت داده نمی‌شود و همچنین تغییرات جانبی تا حد اندکی تحمل می‌شود. شکل ۱۳ تفسیر اولیه زمین‌شناسی مقطع به دست آمده به کمک مدل سرعت پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این تفسیر، مرزهای گنبد نمکی به کمک مدل سرعت به دست آمده، به خوبی نمایان شده و گسل خوردگی در بالای گنبد، فروافتادگی کانال و ناپیوستگی نزدیک سطح به خوبی تفسیر شده‌اند.

همان گونه که دیده می‌شود، مرزهای گنبد نمکی با دقت بیشتر تصویر شده و می‌توان حاشیه‌های آن را با دقت بیشتری تفسیر کرد. مرز فوقانی گنبد، محل گسل خوردگی و حاشیه‌های کانال پر شده نیز با کیفیت بهتری تصویر شده‌اند. در رابطه با مرز پایین گنبد نمکی، به دلیل کیفیت بسیار پایین داده لرزه‌ای در این محدوده، در واقع بازتابی از مرز پایین گنبد نمکی به خوبی گرفته نشده است که بتوان در تصویرسازی به کمک مدل سرعت هیبریدی، آن را بهبود بخشید. اگرچه تنها به کمک داده‌های چاه می‌توان در رابطه با صحت تصویر لرزه‌ای به دست آمده صحبت کرد، با این حال می‌توان بیان کرد که دقت تصویر لرزه‌ای در ساختارهای پیچیده می‌تواند به کمک سرعت‌های به دست آمده توسط روش توموگرافی هیبریدی، بهبود یابد. البته همان گونه که پیشتر بیان گردید، روش‌های تصویرسازی پرتو مبنا ممکن است در مقایسه با روش‌های تصویرسازی با برون‌یابی جبهه موج قابلیت کمتری از خود نشان دهند. بنابراین انتظار تغییر بسیار چشم‌گیر در تصویر نهایی نیز قدری دور از انتظار خواهد بود. در واقع همین مقدار که قدری افزایش کیفیت در داده لرزه‌ای را شاهد باشیم و مهم‌تر از آن، همخوان بودن مدل سرعت لرزه‌ای با



شکل ۱۳: تفسیر اولیه زمین‌شناسی بر روی مقطع به دست آمده به کمک مدل سرعت پیشنهادی

خواهند شد. این فرایند بر روی یک داده مصنوعی و یک داده واقعی در حضور گنبد نمکی با سرعت بالا در یک محیط لایه‌ای پیاده گردید. نتیجه فرایند پیشنهادی بر روی داده‌ها در مقایسه با نتیجه فرایند معمول نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قابلیت تفکیک رخدادها و عوارض ساختمانی در مقاطع لرزه‌ای را دارد. اگر چه مرز پایینی گنبد نمکی در این روش نیز همچنان به خوبی تصویر نشده است. این مساله نشان می‌دهد که عدم ثبت حداقلی رخداد بازتابی و حضور نوفه فراوان، باعث عدم تصویرسازی مناسب خواهد شد. ولی یال‌های گنبد نمکی، کانال پر شده و گسل موجود در بالای گنبد نمکی، همگی با دقت بیشتری به تصویر در آمده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش پیشنهادی، نشان می‌دهد که در ساختارهای نیمه پیچیده تا پیچیده و با کیفیت معمول، می‌توان از الگوریتم پیشنهادی در تهیه مدل سرعت هیبریدی و تصویرسازی لرزه‌ای استفاده کرد.

مراجع

- [1] Cameron, M., S., Fomely, and J., Sethianz, (2008) Time to depth conversion and seismic velocity estimation using time-migration velocity, *Geophysics*, 73(5), 205-210, <https://doi.org/10.1190/1.2967501>
- [2] Dix, C.H., (1955) Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics*, 20(1), 68-86. <https://doi.org/10.1190/1.1438126>

۶- بحث و نتیجه گیری

تهیه مدل سرعت در فرایند پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای، از مهم‌ترین و تاثیر گذارترین مراحل در تهیه تصویر لرزه‌ای است. حضور آنومالی‌های سرعت، ساختارهای با هندسه پیچیده، ناهمسانگردی سرعت و لایه‌های با تباین سرعت بالا نسبت به محیط اطراف، دقت و صحت مدل نهایی به دست آمده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین این عوارض باعث ناپایداری در روش‌های معکوس‌سازی مدل سرعت به روش توموگرافی و عدم دستیابی به جواب بهینه خواهند شد. روش توموگرافی هیبریدی که از روش‌های بسیار کارآمد و به روز در معکوس‌سازی سرعت است، تا حدی از این عوارض تاثیر می‌پذیرد. در این پژوهش، استراتژی پیشنهادی بر اساس ترکیب روش توموگرافی شبکه‌ای و آنالیز سرعت لایه‌ای معرفی گردید که به منظور کنترل روند به روزرسانی مدل سرعت در محدوده‌های دارای آنومالی سرعت است. بدین ترتیب محدوده‌های نرم و سخت در مدل سرعت تعیین گردیدند که علاوه بر جلوگیری از اثر آنومالی سرعت بر روی سایر محدوده‌ها، با کاهش تعداد تکرارها باعث کاهش زمان توموگرافی نیز خواهد شد. در واقع تعیین مرز برای محدوده‌های سخت و نرم باعث می‌شود که در به روزرسانی‌های مدل سرعت، خطاهای هر محدوده تأثیری بر سایر محدوده‌ها نداشته باشد. بدین ترتیب مرزهای سخت و نرم در تکرارهای توموگرافی به صورت مستقل به روز

- [13] Taylor, R.L., E.H., Rutter, S.E.J., Nippres, and K.H., Brodie, (2015), Seismic velocity modelling of the Carboneras Fault Zone, SE Spain, *Tectonophysics*, 646, 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.001>
- [14] Moradpouri, F., A., Morad-Zadeh, R.N.C., Pestana, and M., Soleimani, (2016) Seismic reverse time migration using a new wave field extrapolator and a new imaging condition. *Acta Geophysica*, 64(5), 1673-1690, <http://dx.doi.org/10.1515/acgeo-2016-0076>
- [15] Fa'al Rastegar, S.A., A., Javaherian, N., Keshavarz Farajkhah, M., Soleimani, and A., Zarei, (2016). Effective parameters in ground roll attenuation using FO CRS stacking. *Journal of Applied Geophysics*. 135, 249-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.001>
- [16] Kanli, A.S., (2009), Initial velocity model construction of seismic tomography in near-surface applications. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 52-62, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.09.005>
- [17] Bavali, K., K., Motaghi, F., Sobouti, A., Ghods, M., Abbasi, K., Priestley, G., Mortezaejad, and M., Rezaeian, (2016) Lithospheric structure beneath NW Iran using regional and teleseismic travel-time Tomography, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 253, 97-107, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.02.00>
- [18] Chang, X., (1996) Relationship between ray distribution and reconstructed velocity image in reflection tomography. *Journal of Applied Geophysics*, 35 (2-3), 145-150, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(96\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0926-9851(96)00015-8)
- [19] Flecha, I., Martí, D., Carbonell, R., Escuder-Viruet, J., Pérez-Estaún, A., (2004), Imaging low-velocity anomalies with the aid of seismic tomography. *Tectonophysics*, 388 (1-4), 225-235, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.031>
- [20] Perozzi, L., Gloaguen, E., Rondenay, S., and McDowell, G., (2012), Using stochastic crosshole seismic velocity tomography and Bayesian simulation to estimate Ni grades: Case study from Voisey's Bay, Canada. *Journal of Applied Geophysics*, 78-85-93. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.036>
- [21] Baghzendani, H.R., H., Aghajani, and M., Soleimani, (2015). Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining and Environment*. 6(1), 31-39. <http://dx.doi.org/10.22044/JME.2015.383>
- [22] Jones, I.F., M., Sugrue, and P., Hardy, (2007) Hybrid gridded tomography, *First break*, 25, 15-21. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2007013>
- [3] Farrokhnia, F. A., Roshandel Kahoo, and M., Soleimani, (2018), Automatic salt dome detection in seismic data by combination of attribute analysis on CRS images and IGU map delineation. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 395-407, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.09.018>
- [4] Moradpouri, F., A., Moradzadeh, R.N.C., Pestana, R., Ghaedrahmati, and M., Soleimani, (2017), An improvement in wave-field extrapolation and imaging condition to suppress RTM artifacts, *Geophysics*, 82(6), S403-S409., <https://doi.org/10.1190/geo2016-0475.1>
- [5] Boehm, G., J.M., Carcione, and A., Vesnaver, (1996) Reflection tomography versus stacking velocity analysis. *Journal of Applied Geophysics* 35, 1 – 13. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00025-9](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)00025-9)
- [6] Alaei, B., (2006) An integrated procedure for migration velocity analysis in complex structures of thrust belts, *Journal of Applied Geophysics*, 59, 89-105. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.08.004>
- [7] Sangvai, P., A., Biswal, M., Mathur, J., Fruehn, P., Smith, I.F., Jones, and M., Goodwin, (2008) Complex imaging challenges: offshore south east India, 7th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Heydar-Abad, Extended Abstract, P38 .
- [8] Woodward, M.J., D., Nichols, O., Zdraveva, P., Whitfield, and I.F., Johns, (2008), A decade of tomography, *Geophysics*, 73(5), 5-11, <https://doi.org/10.1190/1.2969907>
- [9] Adler, F., R., Baina, M.A., Soudani, P., Cardon, and J.B., Richard, (2008) Nonlinear 3D tomographic least-squares inversion of residual moveout in Kirchhoff prestack-depth-migration common image gathers, *Geophysics*, 73(5), 13-23, <https://doi.org/10.1190/1.2956427>
- [10] Lurka, A., and P., Swanson, (2009) Improvements in seismic event locations in a deep western U.S. coal mine using tomographic velocity models and an evolutionary search algorithm. *Mining Science and Technology*, 19(5), 599-603. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60111-3](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60111-3)
- [11] Cai, W., D., Linmin, A., Cao, S., Gong, and Z., Li, (2014) Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China, *Journal of Applied Geophysics*, 109, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.07.021>
- [12] Raji, W.O., J.M., Harris, and S., Lu, (2016) Seismic velocity tomography for CO₂ monitor in subsurface geological structures, *Journal of King Saud University- Science*, 30(1), 57-64, <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.10.006>

- [23] Rawlinson, N., S., Pozgay, and S., Fishwick, (2010) Seismic tomography: A window into deep Earth, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178(3-4), 101-135. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.10.002>
- [24] Radfar, A., A., Rahimi, A., Nejati, M., Soleimani, and F., Taati, (2018). New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 1-24, <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1659-x>
- [25] Campbell, A.G., E., Evans, D., Judd, I.F., Jones, and S., Elam, (2006) Hybrid gridded tomography in the southern North Sea. 76th SEG Annual Meeting, New Orleans. Extended Abstracts, 520-524 .
- [26] Shahbazi, A., D., Ghosh, M., Soleimani, and A., Gerami, A., (2016) Seismic imaging of complex structures with the CO-CDS stack method. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 60 (4), 662-678, <http://dx.doi.org/10.1007/s11200-015-0452-6>
- [27] Guo, J., H., Zhou, J., Young, and S., Gray, (2002) Towards accurate velocity models by 3D tomographic velocity analysis, 64th EAGE Conference & Exhibition, Florence.
- [28] Pahlavanloo, A., M., Soleimani, and C., Gallo, (2017) Improving seismic image in complex structures by new solving strategies in the CO-CRS and the CO-CDS methods. *Iranian Journal of Geophysics*, 10(5), 42-56.
- [29] Badal, J., Y., Chen, M., Chourak, and J., Stankiewicz, (2013) S-wave velocity images of the Dead Sea Basin provided by ambient seismic noise. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.06.017>
- [30] Vahid Hashemi, M., and M., Soleimani, M., (2014), Lateral velocity heterogeneities modeling in seismic tomography by introducing different initial velocity models. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(4), 132-167.
- [31] Tahara, M., Uehira, K., Shimizu, H., Nakada, M., Yamada, T., Mochizuki, K., Shinohara, M., Nishino, M., Hino, R., Yakiwara, H., Miyamachi, H., Umakoshi, K., Goda, M., Matsuwo, N., Kanazawa, T., (2008), Seismic velocity structure around the Hyuganada region, Southwest Japan, derived from seismic tomography using land and OBS data and its implications for interpolate coupling and vertical crustal uplift. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 167(1-2), 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.02.001>

¹ Ray² Residual Moveout inversion³ Spline⁴ Ray Tracing⁵ Paraxial Ray⁶ Central ray⁷ Anterior Surface⁸ Posterior Surface⁹ Slowness Vector¹⁰ Kinematic Ray Tracing¹¹ Dynamic Ray Tracing¹² Global Updating¹³ Overturn ray¹⁴ Prismatic ray¹⁵ Angle gathers¹⁶ Migration Velocity Analysis (MVA)¹⁷ Common Image gather (CIG)