

مدل سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک به منظور آشکار سازی منابع هیدروکربوری با روش دوقطری سازی لنکزوس (مطالعه موردی: منطقه کاشان)

فائقه میناعراقی^۱، میرستار مشین‌چی اصل*^۲، علی نجاتی کلاته^۲ و محمود میرزایی^۳

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

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

۳- دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۴

چکیده

روش مگنتوتلوریک از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی طبیعی و متغیر با زمان در سطح زمین جهت پی بردن به ساختارهای الکتریکی زمین مثل اکتشاف ساختارهای حاوی مواد هیدروکربوری استفاده می‌کند. در فرآیند وارون سازی داده‌های مگنتوتلوریک، روش محاسبه وارون ماتریس تأثیر به‌سزایی در سرعت وارونگی و کیفیت مدل‌های به‌دست آمده دارد. روش دوقطری سازی لنکزوس یک روش سریع و مؤثر برای مسائل وارون است. در این الگوریتم، سیستم روابطی با ابعاد کمتر جایگزین روابط اصلی می‌شود. علاوه بر این برای تعیین پارامتر تنظیم از روش متعادل سازی قید فعال استفاده شده است. نتایج وارون سازی داده‌های مصنوعی نشان داد که روش لنکزوس سریع‌تر از روش متداول گرادیان مزدوج است و مدل به‌دست آمده با این روش کیفیت بهتری دارد. روش پیشنهادی همچنین بر روی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه کاشان اعمال شد. مدل به‌دست آمده سازند قم را که مهم‌ترین سنگ مخزن و سنگ منشأ هیدروکربوری در ایران مرکزی است و دیگر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه از قبیل ناقدیس نواب و گسل‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل سازی با دو روش لنکزوس و گرادیان مزدوج و مقایسه آن‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که مدل سازی با روش لنکزوس نتایج قابل قبول‌تر و نزدیک‌تری به مدل واقعی زمین نسبت به مدل به‌دست آمده با روش دیگر از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مگنتوتلوریک، دوقطری سازی لنکزوس، سازند قم، متعادل سازی قید فعال، کاشان

مقدمه

روش مگنتوتلوریک یک روش ژئوفیزیکی با چشمه طبیعی است که از اندازه‌گیری سطحی تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی زمین در دو جهت متقاطع برای اکتشاف و شناسایی ساختارهای زیر سطحی استفاده می‌کند. در این روش تغییرات میدان الکترومغناطیسی طبیعی موجود در اطراف زمین جریان‌های الکتریکی را در زمین القا می‌کنند، این جریان‌های القایی نیز میدان‌های الکترومغناطیسی ثانویه را با توجه به میزان رسانندگی تشکیلات زیر سطحی تولید می‌کنند. بنابراین با ثبت هم‌زمان مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی، میدان‌های الکترومغناطیسی در فرکانس‌های مختلف اطلاعات مفیدی درباره خصوصیات الکتریکی لایه‌های زیرسطحی به دست می‌دهند. فرض بر این است که امواج الکترومغناطیسی به شکل تخت بوده و به‌طور قائم به سطح زمین برخورد و درون زمین منتشر می‌شوند [۱-۲]. محدوده فرکانس مورد مطالعه در روش مگنتوتلوریک با چشمه طبیعی ۰/۰۰۰۰۱ تا ۱۰۰۰۰ Hz است. در مناطقی که به‌کارگیری روش لرزه‌نگاری به دلایلی مانند توپوگرافی شدید منطقه و وجود حفره‌های وسیع زیرزمینی با مشکل روبرو است روش مگنتوتلوریک می‌تواند به‌عنوان یک روش کاربردی مفید مورد استفاده قرار گیرد [۳]. اکتشافات نفتی به‌روش مگنتوتلوریک از دهه ۱۹۶۰ در کشور شوروی به شکل موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. واتس و پینس [۴] یک مثال از اکتشاف نفت با استفاده از روش مگنتوتلوریک را در جنوب ترکیه ارائه کردند. در این مطالعه، محیط مورد بررسی شامل یک لایه نسبتاً نرم شامل رسوبات عمیق دریایی با مقاومت ویژه پایین که با توده‌های افیولیتی درآمیخته شده‌اند، بر روی کربنات‌های سخت با مقاومت ویژه بالا فرارنده قرار گرفته‌اند. در چنین شرایطی به‌دلیل حضور توده‌های متنوع و در هم آمیخته سنگ‌شناسی، کیفیت داده‌های لرزه‌ای به‌شدت

پایین می‌آید اما داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در این ناحیه تصویر به مراتب واضح‌تری را ارائه نمودند. در دهه‌های اخیر، روش مگنتوتلوریک به‌شکل خاص در اکتشاف مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵-۶]. در ایران نیز از روش مگنتوتلوریک در اکتشاف میادین نفت و گاز استفاده شده است. هاشمی [۷] با وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری کپه داغ غربی توانست تاقدیس و ناودیس کنند در کپه داغ غربی و همچنین، گسل مراره را به‌خوبی شناسایی کند. منصوری و همکاران [۸] با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در میدان نفتی سه‌قنات هندسه کلی و جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی را با دقت بالایی تعیین کردند. البرزبان و همکاران [۹] به‌منظور تشخیص ساختارهای هیدروکربونی منطقه گچساران از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک استفاده کردند و نشان دادند مدل‌سازی انجام شده توانسته بالای سازند آسماری و ساختارهای تاقدیسی با دقت خوبی مدل نماید. در این تحقیق بعد از پردازش داده‌های سری زمانی منطقه کاشان، با محاسبه مقادیر تانسور امپدانس (Z) مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز در حوزه فرکانس تعیین گردیده‌اند. پس از اجرای کلیه مراحل پردازشی اولیه داده‌های برداشت شده، دو روش گرادیان مزدوج و لنکزوس برای وارون‌سازی بر روی داده‌ها اعمال می‌شوند و در نهایت مدل‌های مقاومت ویژه به‌دست آمده از دو الگوریتم با اطلاعات و مقاطع زمین‌شناسی منطقه برای اعتبارسنجی مقایسه خواهند شد.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

در حال حاضر، حوضه رسوبی زاگرس یکی از بزرگ‌ترین ذخایر هیدروکربونی جهان شناخته می‌شود و هر ساله تعداد زیادی عملیات اکتشافی ژئوفیزیکی به‌منظور پی‌جویی مخازن جدید در آن در حال اجرا است.

و همچنین، مؤلفه های افقی و عمودی مغناطیسی روی سطح زمین توسط دو جفت از الکترودهای غیرقابل قطبش و پیچیده های مغناطیس سنج القایی اندازه گیری شده اند. این داده ها توسط شرکت چینی سینوپک و با نظارت مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران جمع آوری شده است. پروفیل مورد مطالعه شامل ۲۹۵ ایستگاه به طول ۶۰ km است که عمود بر ساختار زمین شناسی منطقه که تقریباً بصورت شمال غربی - جنوب شرقی است برداشت شده است. همچنین، در طول این پروفیل داده های لرزه ای نیز برداشت شده است. تانسور امپدانس (Z) که نسبت بین مؤلفه های افقی میدان های الکتریکی و مغناطیسی است، به عنوان تابعی از فرکانس تعیین می شود. در نهایت، مقاومت ویژه ظاهری و فاز را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{xy}|^2 \quad \phi_{xy} = \arg(Z_{xy}) \quad (1)$$

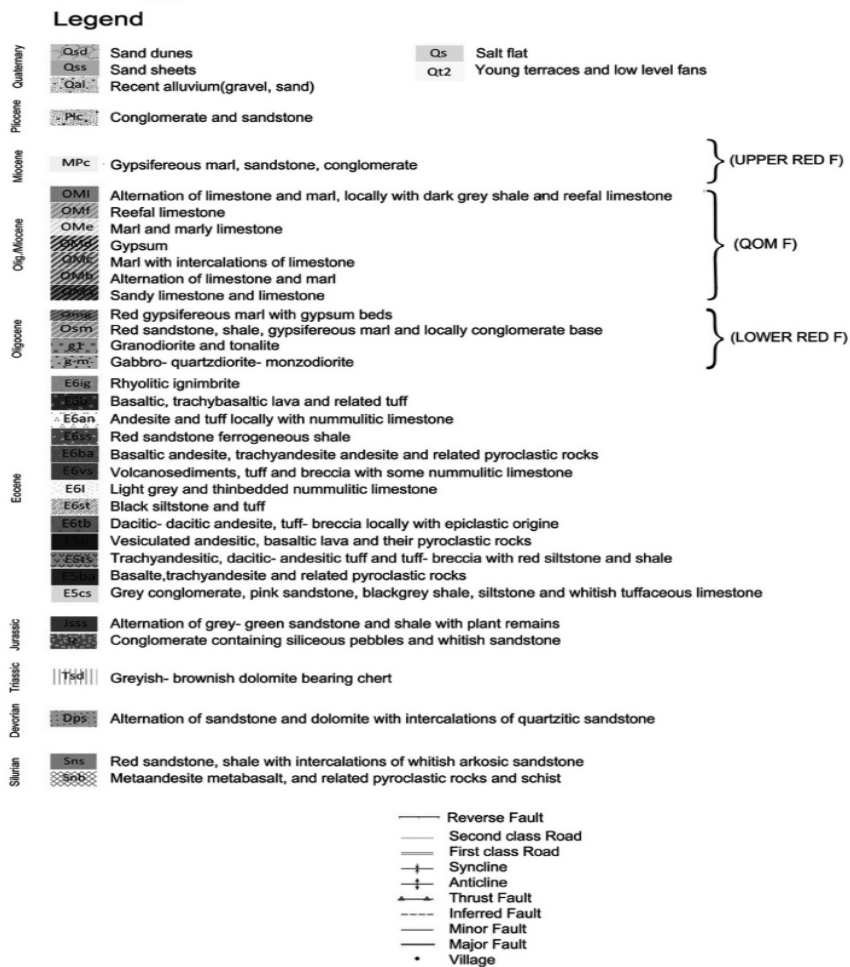
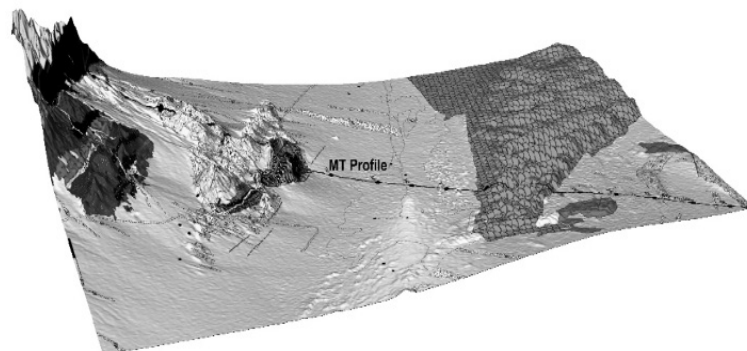
$$Z_{yx} = E_x / H_y \quad \phi_{yx} = \arg(Z_{yx}) \quad \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z_{yx}|^2 \quad (2)$$

و $Z_{yx} = E_y / H_x$ امپدانس در دو حالت TE و TM به ترتیب می باشند [۱۲]. نمودارهای مقاومت ویژه و فاز برای دو ایستگاه به عنوان نمونه در شکل ۲ آورده شده است. منحنی های فاز و مقاومت ویژه ظاهری در هر دو حالت و در فرکانس های بالا یکسان هستند در حالی که این منحنی ها در فرکانس های پایین ویژگی های متفاوتی از خود نشان داده اند و از یکدیگر جدا شده اند. این اختلاف می تواند مربوط به تغییرات مقاومت ویژه ساختارهای دوبعدی و یا سه بعدی در اعماق زیاد باشد.

تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی داده های مگنتوتلوریک ابزار قدرت مندی برای تعیین ساختارهای زیرسطحی منطقه قبل از انجام مدل سازی می باشد. روش های مختلفی برای تخمین بعد داده های مگنتوتلوریک پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به روش اسکویو [۱۳]، نمودارهای موهر [۱۴]، نمودارهای

بیشترین ذخایر نفتی و گازی حوضه زاگرس در ارتباط با مخازن آهکی و کربناته است [۱۰]. با توجه به چینه شناسی منطقه مورد مطالعه، سازند قم را باید سنگ منشا هیدروکربن در ناحیه دانست که قسمت های بالایی و پایینی آن به ترتیب سازند قرمز فوقانی و سازند قرمز پایینی می باشند. سازند قرمز بالایی از لایه های کنگلومرا، ماسه سنگ و مارن ژئوپس دار تشکیل شده است که می تواند به عنوان سنگ پوش در نظر گرفته شود. با توجه به تغییر طولی در سنگ شناسی، سازند قم را می توان به شش واحد e، d، c، b، a و f از پایین به بالا تقسیم کرد. بخش a شامل سنگ آهک ماسه ای و سنگ آهک و توف است. سنگ شناسی بخش b تناوبی از سنگ آهک و مارن است. بخش c حاوی مارن با میان لایه های سنگ آهک است. واحد d نازک است و سنگ شناسی آن عمدتاً سنگ گچ است. بخش e مارن و سنگ آهک مارنی دارد. بخش f شامل لایه های آهکی و سنگ آهک ریفی یا مرجانی است که دارای پتانسیل نفتی است. در مجموع سازند قم در کاشان مجموعه ای از مخازن متخلخل آهکی با شکستگی نسبتاً توسعه یافته است. سازند قرمز پایینی در زیر سازند قم قرار دارد و دارای ماسه سنگ، کنگلومرا، مارن قرمز همراه با واسطه هایی از سنگ های آتشفشانی اندزیتی می باشد [۱۱]. همچنین در طول پروفیل، تاقدیس زیبایی برونزد دارد که به نام تاقدیس نواب شهرت یافته است. عمده واحدهای دو یال این تاقدیس از سازند قم تشکیل یافته است اما یال جنوبی با ضخامت حدود ۴۳۰ m کامل تر بوده و یال شمالی بیشتر فرسایش یافته است. موقعیت خط برداشت در منطقه کاشان روی نقشه توپوگرافی در شکل ۱ نشان داده شده است. برداشت داده های مگنتوتلوریک در منطقه مورد مطالعه، با اندازه گیری میدان های الکتریکی در دو جهت افقی ($E_x E_y$) و مغناطیسی در دو جهت افقی ($H_x H_y$) و یک جهت عمودی (H_z) انجام شده است. مؤلفه های افقی میدان الکتریکی



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه

تانسور امیدانس هستند. زاویه اسکيو تانسور فاز تقارن یا عدم تقارن این تانسور را نشان می‌دهد. این زاویه با رابطه زیر تعریف می‌شود:

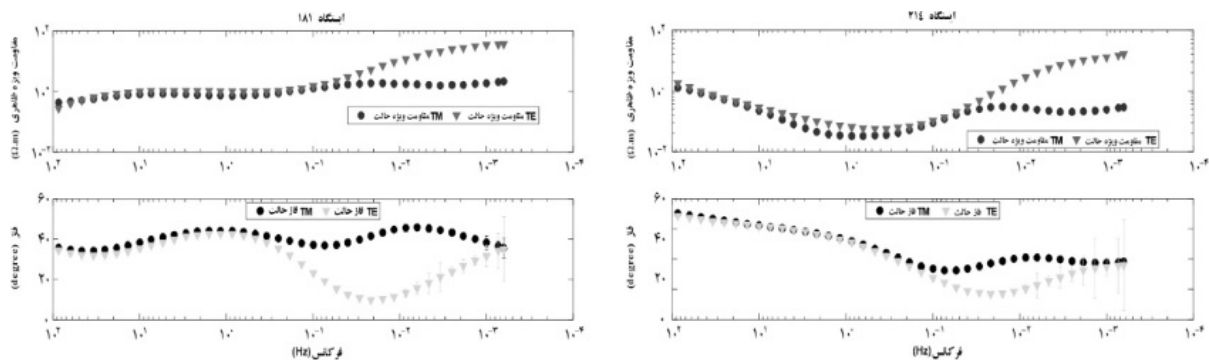
$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{XY} - \phi_{YX}}{\phi_{XX} - \phi_{YY}} \right) \quad (4)$$

زاویه اسکيو تانسوز فاز را برای داده‌های کاشان و برای تعدادی از ایستگاه‌ها و در تمام پریودها محاسبه کرده‌ایم.

قطبی امیدانس [۱۵]، اندیس‌های وزنی نرمال شده [۱۶]، تانسور فاز [۱۷] و کد والدیم [۱۸] اشاره کرد. در این مقاله برای تحلیل ابعادی از تانسور فاز استفاده شده است. تانسور فاز با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = X^{-1}Y = \begin{pmatrix} \phi_{XX} & \phi_{XY} \\ \phi_{YX} & \phi_{YY} \end{pmatrix} \quad (3)$$

در این رابطه، X و Y قسمت‌های حقیقی و موهومی



شکل ۱- نمودار جریان فرآیندی فرآیند در نرم افزار ASPEN HYSYS

وارون سازی به نتایج معقول تری مرتبط به تشکیلات زیر سطحی صورت گیرد، روش منظم سازی تیخونوف به کار برده شده است. در این روش برای وارون سازی داده های برداشت شده کنونی مسأله وارون سازی از طریق کمینه سازی یک تابع هدف صورت گرفته است که این تابع هدف وابسته به داده های مشاهده ای و داده های پیش بینی شده بوده و به صورت رابطه زیر تعریف گردیده است:

$$P(m) = \phi(m) + \lambda^2 s(m) \quad (6)$$

که $\phi(m)$ تابع عدم برازش بین داده های مشاهده ای و داده های پیش بینی شده و $s(m)$ تابع منظم ساز نامیده می شود. با خطی سازی رابطه Δ تغییرات پارامترهای مدل به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$\Delta m = (J^T J + \lambda^2 W^T W)^{-1} J^T \Delta d \quad (7)$$

که W ماتریس وزن پارامترهای مدل، λ پارامتر تنظیم، Δd اختلاف بین داده های مشاهده شده و محاسبه شده، Δm تغییرات مدل برآورد شده و J ماتریس حساسیت یا ماتریس مشتقات پاره ای مرتبه اول یا ماتریس ژاکوبین می باشد [۲۰-۲۱]. در فرآیند وارون سازی ابتدا Δd و ماتریس حساسیت J با استفاده از یک مدل اولیه m_0 که بردار ستونی صفر در نظر گرفته می شود، محاسبه می شود. سپس شرط توقف برای فرآیند وارون سازی کنترل می شود. اگر خطای ناشی از اختلاف بین داده مشاهده شده و پاسخ مدل کوچک تر یا مساوی خطای ناشی از یک مقدار آستانه ای کوچک تعریف شده باشد فرآیند وارون سازی متوقف می شود.

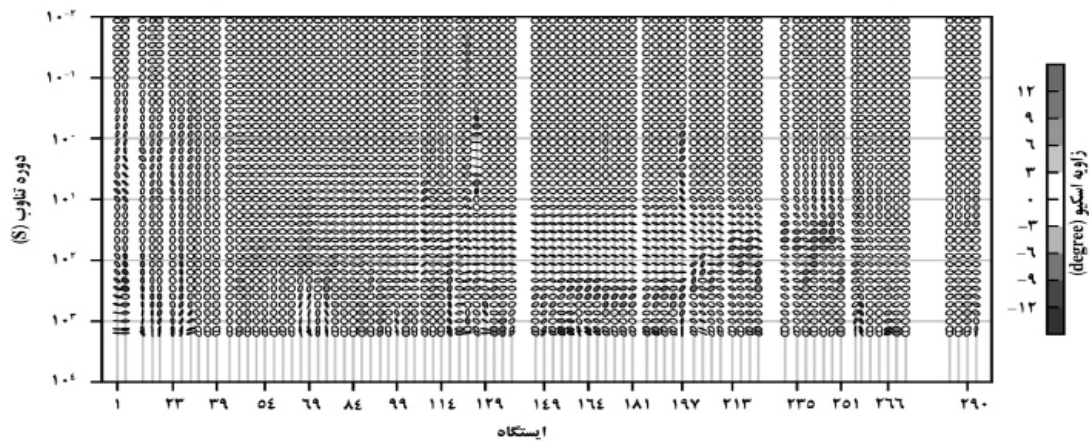
نتایج این محاسبات به صورت بیضی هایی از تانسور فاز به صورت یک شبه مقطع در شکل ۳ آورده شده است. تانسور فاز برای ساختارهای یک بعدی بصورت دایره و برای ساختارهای دوبعدی و سه بعدی بیضی می باشد. همچنین، مقادیر اسکيو در این شکل برای ساختارهای یک بعدی و دوبعدی صفر است در حالی که برای مقادیر اسکيو $|\beta| \geq 3$ ساختارها سه بعدی می باشند [۱۹]. تحلیل ابعادی صورت گرفته بیانگر این است که ساختارهای زیر سطحی در ایستگاه های انتخاب شده، در فرکانس های زیاد و میانی یک بعدی یا دوبعدی هستند. اما در باند فرکانسی پایین روش تحلیل ابعادی حالت سه بعدی را تشخیص داده است که این محدوده فرکانسی مربوط به عمق های زیاد می باشد که بخشی از انتهای مدل را شامل می شود که مرتبط و مورد علاقه برای اهداف اکتشافی ذکر شده نمی باشد. لذا، انتخاب وارون سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک معقول می باشد.

وارون سازی داده ها به روش لنکزوس و گرادیان مزدوج

مسأله پیشرو در روش مگنتوتلوریک دو بعدی به صورت زیر بیان می شود:

$$d^m = F(m) \quad (5)$$

که F تابع پیشرو غیر خطی، "m" بردار پارامتر مدل و d^m بردار داده های پیش بینی شده یا پاسخ مدل است. یکی از روش های پر کاربرد برای آنکه نتایج



شکل ۳ شبه مقطع تانسور فاز برای پروفیل برداشت شده در نرم‌افزار MTPy

روش گرادیان مزدوج همچنین یکی از روش‌های تکراری متداول برای حل سیستم روابط خطی است. جزئیات این روش در مقاله هستنس و استیفل [۲۴] به خوبی بررسی شده است.

محاسبه پارامتر منظم‌سازی به روش متعادل‌ساز قید فعال

تعیین مقدار بهینه پارامتر منظم‌سازی یا ضرایب لاگرانژ، درحالی‌که تعادل بین تابع عدم برازش و تابع منظم ساز تیخونوف را حفظ کند، از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۵]. در مدل‌سازی معکوس سعی می‌شود برآورد خوبی از پارامتر تنظیم داشته باشیم. اما پیدا کردن بهترین ضریب، کار ساده‌ای نیست. به لحاظ نظری، مقادیر بزرگ برای پارامتر تنظیم، قیدهای بیشتری را به جواب اعمال می‌کند و تفکیک‌پذیری ضعیف‌تری از پارامترها را به دست می‌دهد. از سوی دیگر مقادیر کم پارامتر تنظیم بر پایداری وارون اثر منفی دارد. یک مقدار بینابینی به بهینه برای پارامتر تنظیم به‌منظور دستیابی به تفکیک‌پذیری و پایداری لازم است. این رهیافت این حقیقت را نادیده می‌گیرد که همه پارامترها، تفکیک‌پذیری یکسانی ندارند. بنابراین تغییر پارامتر تنظیم در حین هم‌گرایی معکوس‌سازی برای دستیابی به تفکیک‌پذیری بیشتر و پایداری ترجیح داده می‌شود [۲۶].

در غیر این صورت مدل اولیه با استفاده از تغییرات مدل برآورد شده بروزرسانی می‌گردد. دستگاه روابط خطی V را می‌توان با روش تقریب کمترین مربعات حل کرد:

$$\min \left\| \begin{pmatrix} J \\ \lambda W \end{pmatrix} \Delta m - \begin{pmatrix} \Delta d \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2 \quad (8)$$

برای بروزرسانی کردن پارامتر مدل و برآورد تغییرات پارامترهای مدل از دو روش تکراری لنگزوس و گرادیان مزدوج استفاده شده است. روش لنگزوس از روش گرادیان مزدوج سریع‌تر است چون از ضرب ماتریس‌های بزرگ در این روش جلوگیری می‌شود. در این روش، سیستم روابط اصلی با یک سیستم روابط با ابعاد کمتر جایگزین می‌شود در نتیجه سرعت حل مسأله با دقت بالا افزایش می‌یابد [۲۲-۲۳]. الگوریتم دو قطری‌سازی لنگزوس به‌طور خلاصه در زیر آورده شده است:

Algorithm

$$J \in R^{n \times m}, \Delta d \in R^n, 0 < l < \min\{m, n\}, \{u_j\}_{j=1}^{l+1}, \{v_j\}_{j=1}^l, \\ \{\rho_j\}_{j=1}^l, \{\sigma_j\}_{j=1}^{l+1} \\ \sigma_1 = \|\Delta m\|; u_1 = \Delta d / \sigma_1; \tilde{v}_1 = J^T u_1 \\ \rho_1 = \|\tilde{v}_1\|; v_1 = \tilde{v}_1 / \rho_1 \\ \text{for } j = 2, 3, \dots, l \text{ do} \\ \tilde{u}_j = J v_{j-1} - \rho_{j-1} u_{j-1}; \sigma_j = \|\tilde{u}_j\|; u_j = \tilde{u}_j / \sigma_j; \\ \tilde{v}_j = J^T u_j - \sigma_j v_{j-1}; \rho_j = \|\tilde{v}_j\|; v_j = \tilde{v}_j / \rho_j; \\ \text{end } j; \\ \tilde{u}_{l+1} = J v_l - \rho_l u_l; \sigma_{l+1} = \|\tilde{u}_{l+1}\|; u_{l+1} = \tilde{u}_{l+1} / \sigma_{l+1};$$

کمتری تطابق بسیار بهتری نسبت به روش گرادیان مزدوج را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۶ در حالت TE الگوریتم لنکزوس پس از $579/8$ s و در تکرار ۸ ام به مقدار RMS مطلوب رسید در حالی که الگوریتم گرادیان مزدوج پس از $722/2$ s و در تکرار ۹ ام به مقدار RMS مطلوب رسید. با توجه به نتایج وارون‌سازی مشاهده می‌شود که روش لنکزوس در هر دو بهتر از روش گرادیان مزدوج است ولی حالت TM در روش لنکزوس بهترین و نزدیک‌ترین جواب را به مدل مصنوعی ایجاد شده دارد زیرا داده‌های حالت TE در مقایسه با حالت TM نسبت به تغییرات جانبی حساس نیست [۲۹].

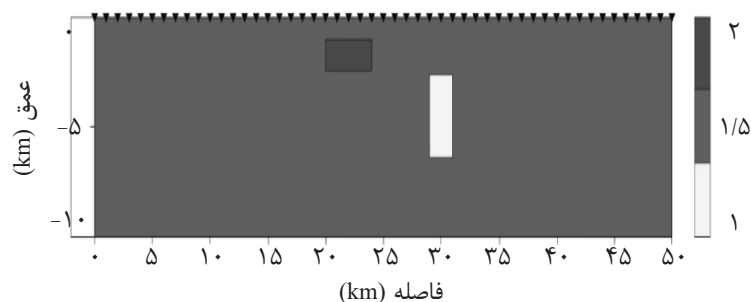
وارون‌سازی داده‌های واقعی

بلوک کاشان نخستین بلوک اکتشافی است که دارای پتانسیل نفت و گاز می‌باشد که در قسمت شرقی حوضه مرکزی ایران با مساحت تقریباً 2×15000 Km واقع شده است. به منظور بررسی ساختار زیرسطحی در این بلوک داده‌های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیلی به طول تقریباً 60 Km با 295 ایستگاه برداشت شده است که فاصله بین ایستگاه‌ها 200 m می‌باشد و در امتداد شمال شرقی جنوب غربی قرار گرفته است. با انجام تحلیل ابعادی نشان داده شد که ساختارهای عمیق زیرسطحی منطقه کاشان عمدتاً دو و یا بعضاً سه‌بعدی می‌باشند. برای انجام مدل‌سازی‌های دوبعدی داده‌های برداشت شده منطقه مورد مطالعه، از روش لنکزوس و گرادیان مزدوج استفاده شده است.

از این‌رو، این روش در مقایسه با حالتی که یک مقدار ثابت برای پارامتر تنظیم در وارون به کار می‌رود دقیق‌تر است. یک روش جایگزین به منظور استفاده از پارامتر تنظیم متغیر با تکرار در فرآیند وارون، استفاده از پارامتر تنظیم متغیر با مکان است [۲۷]. به منظور استفاده از λ به عنوان یک متغیر مکانی (x_p, y_p, z_p, λ) ، یی و همکاران [۲۸] روش متعادل‌ساز قید فعال را پیشنهاد کردند.

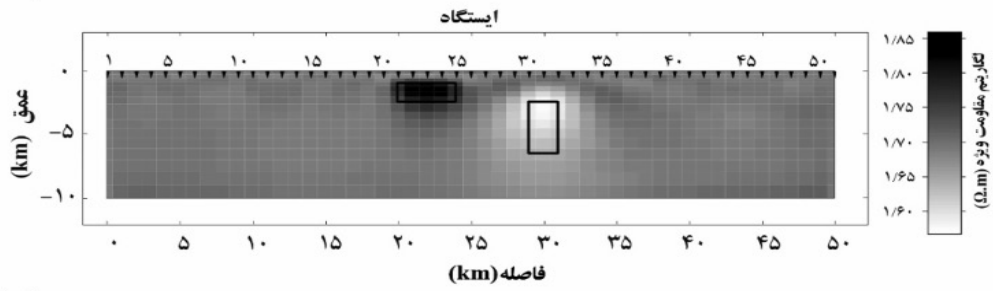
وارون‌سازی داده‌های مصنوعی

برای ارزیابی روش به کار برده شده یک مدل مصنوعی ساده دو بعدی مانند شکل ۴ در نظر گرفته شد. این مدل شامل دو بلوک با مقاومت ویژه $\Omega.m$ با ابعاد 2×4 Km و در عمق $2/5$ Km و دیگری با مقاومت ویژه 100 با ابعاد $4 \times 1/5$ Km در عمق 1 Km می‌باشد که در یک زمینه با مقاومت ویژه 50 قرار گرفته است. برای تولید داده‌های مصنوعی 51 ایستگاه برای اندازه‌گیری داده‌های مگنتوتلوریک با فواصل 1000 m در طول یک پروفیل روی مدل مذکور طراحی شده است. محدوده فرکانسی برای تولید داده‌های مدل مصنوعی بین $100 - 0/001$ Hz و تعداد 51 فرکانس انتخاب شدند. به داده‌ها 2% نویز اضافه شده است. شکل‌های ۵ و ۶ مدل‌سازی حاصل از داده‌ها در دو حالت TE و TM را با دو روش لنکزوس و گرادیان مزدوج به ترتیب نشان می‌دهند که مدل حاصل از این دو روش بعد از $323/4$ s و $617/3$ به مقادیر RMS مطلوب رسیدند. به خوبی در این اشکال دیده می‌شود که وارون‌سازی حاصل از حالت TM در روش لنکزوس در تعداد تکرار و زمان

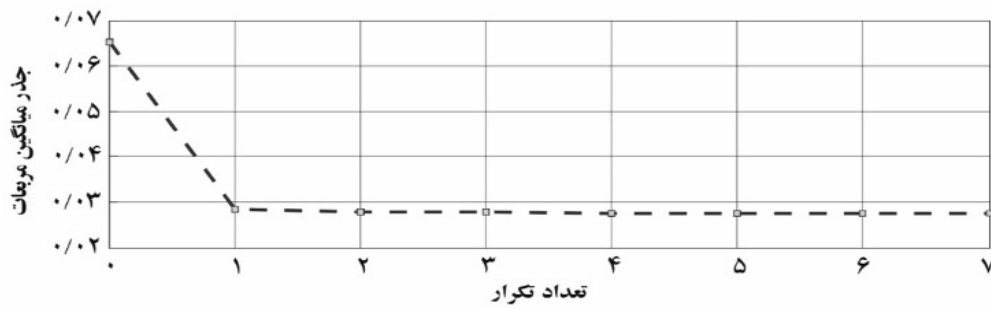


شکل ۴ مدل مصنوعی

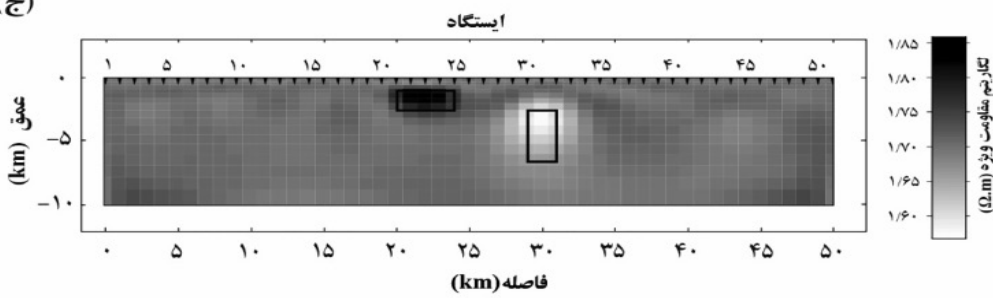
(الف)



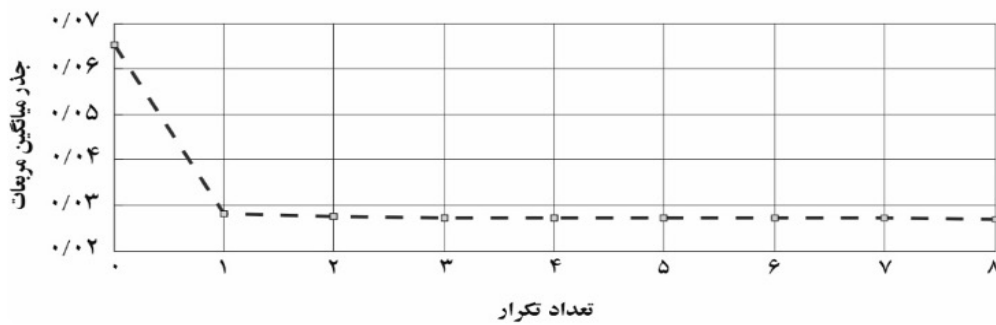
(ب)



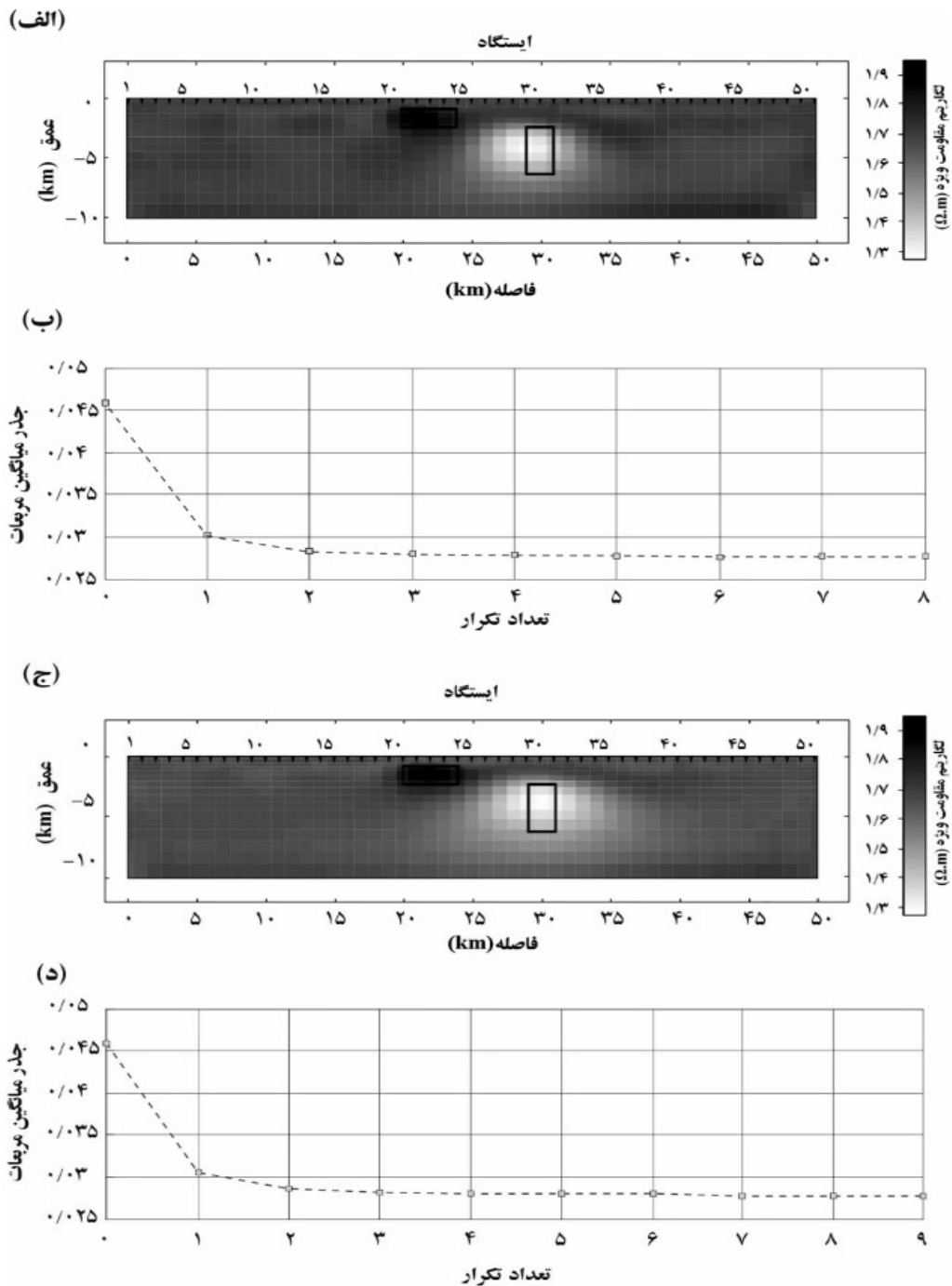
(ج)



(د)



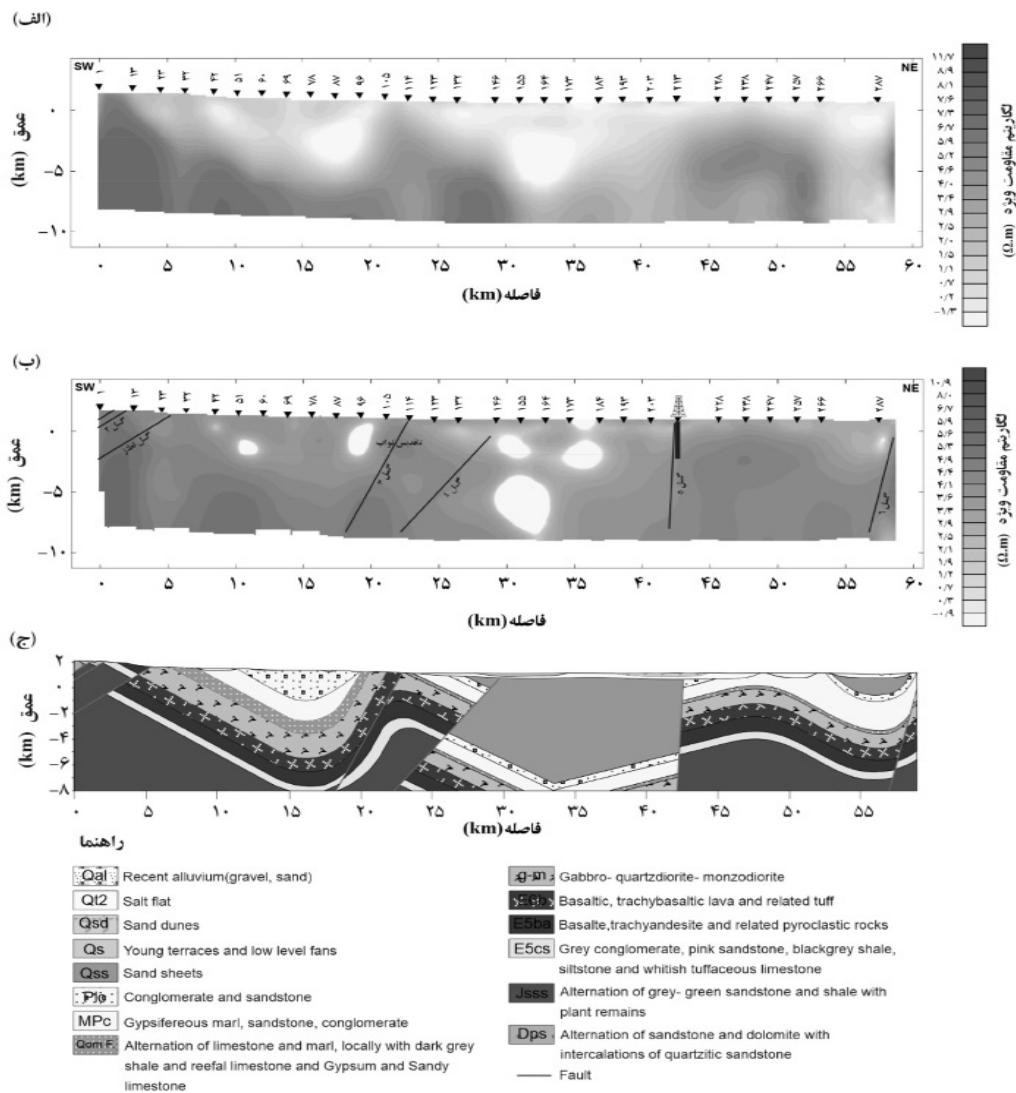
شکل ۵ مدل به دست آمده در حالت TM با استفاده از الف) روش لنگزوس ب) جذر میانگین مربعات با روش لنگزوس ج) روش گرادینان مزدوج د) جذر میانگین مربعات با روش گرادینان مزدوج



شکل ۶ مدل به دست آمده در حالت TE با استفاده از الف) روش لنکزوس ب) جذر میانگین مربعات با روش لنکزوس ج) روش گرادیان مزدوج د) جذر میانگین مربعات با روش گرادیان مزدوج

کمی برخوردار است که مقاومت کم در این لایه به علت وجود آبرفت، کنگلومرا و ماسه سنگ است (سازند قرمز بالایی M1). به جز در ابتدای پروفیل که در عمق های کم یک زون با مقاومت ویژه بالا وجود دارد که مرتبط با بازالت، کوارتزدیوریت و گابرو می باشد.

شکل ۷ ب) نشان می دهد که روش لنکزوس مدل بهتری را در زمان سریع تری نسبت به روش گرادیان مزدوج (شکل ۷ الف)) بازیابی می کند که با مقطع زمین شناسی هم تطابق خوبی دارد. مدل مقاومت ویژه به دست آمده در شکل ۷ ب)، نشان می دهد که لایه اول در کل پروفیل از مقاومت ویژه نسبتا



شکل ۷ مقایسه وارون سازی داده های کاشان در حالت TM (الف) مدل به دست آمده با روش گرادینان مزدوج (ب) مدل حاصل از روش لنکزوس و (ج) مقطع زمین شناسی

و همچنین ۳۵ تا ۴۳ km از سطح به عمق مقاومت ویژه افزایش می یابد طوری که بعد از لایه مارن ژپس دار سازند قم وجود دارد که مقاومت ویژه در این نواحی از ۰/۳۹ $\Omega.m$ تا ۶۵ $\Omega.m$ تغییر می کند. اکتشاف هیدروکربن در میدان نفتی کاشان بر سازند قم متمرکز شده است. براساس نتایج به دست آمده، بالای سازند قم در عمق ۲۱۷۳/۲ m زیر سطح دریا واقع شده است. نکته جالب توجه در این مدل تشخیص تاقدیس نواب است که به خوبی در شکل نشان داده شده است. گسل های نمایش داده شده در مدل مقاومت ویژه همبستگی خوبی با گسل های مقطع زمین شناسی دارد.

مقدار مقاومت ویژه سطحی از ۱۱۳۰ $\Omega.m$ تا ۰/۳۴ تغییر می کند. در ابتدا و انتهای پروفیل مقاومت ویژه با عمق افزایش می یابد که شامل توده های نفوذی می باشد و در این دو ناحیه بالا آمدگی تشکیلات سنگی به وضوح مشاهده می شود. در بخش مرکزی پروفیل در فاصله بین ۲۸-۳۸ km از سطح به عمق به علت وجود مارن ژپس دار و انیدریت مقاومت ویژه به شدت کاهش می یابد (سازند قرمز بالایی M2) و تا نزدیکی عمق ۱۰ km ادامه می یابد. از منظر سنگ شناسی هر دو لایه M1 و M2 را می توان به عنوان سنگ پوش سازند قم در نظر گرفت. در فاصله های افقی بین ۲۸ تا ۳۰ km

TE مدلی با کیفیت بهتر و در زمان کوتاه تری را بازسازی می کند. همچنین، روش پیشنهادی بر روی داده های واقعی منطقه کاشان اعمال گردید. مدل وارون به دست آمده توسط این روش نشان می دهد که این روش قادر به تشخیص معقولی از موقعیت گسل های موجود در منطقه، مرز فوقانی سازند قم و تاق دیس نواب می باشد. از مقایسه مقطع لرزه ای با مدل به دست آمده از داده های مگنتوتلوریک، می توان نتیجه گرفت که این روش نقاط ضعف ناشی از داده های لرزه ای را به شکل مطلوبی برطرف می سازد.

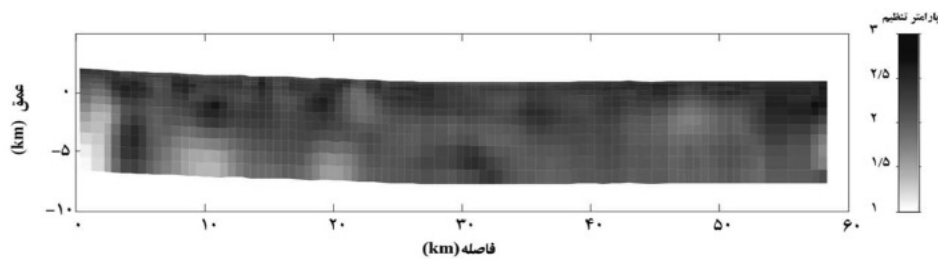
تشکر و قدردانی

در پایان لازم می دانیم از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در جهت به انجام رسیدن این تحقیق تقدیر و تشکر کنیم به خصوص جناب آقای دکتر قمی که برای تهیه مجموعه داده ها کمک شایانی کردند.

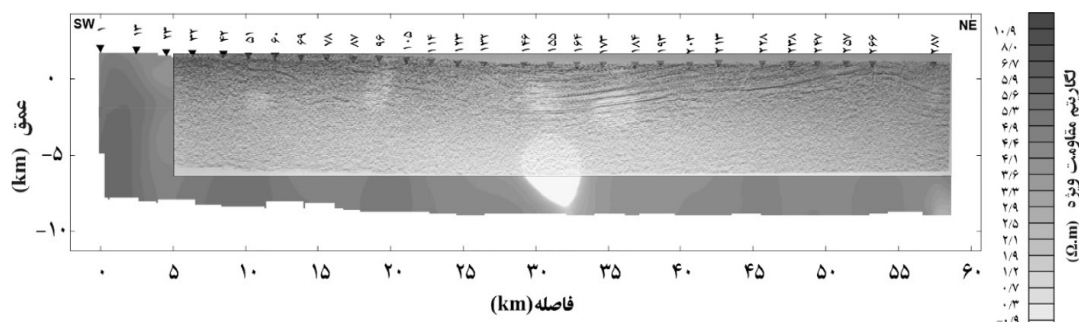
شکل ۸ توزیع پارامتر λ را نشان می دهد. پارامترهای تنظیم بالاتر به پارامترهای با قدرت تفکیک پایین تر و برعکس اختصاص دارد. پروفیل لرزه ای به گونه ای انتخاب شده است که با پروفیل مگنتوتلوریک در ناحیه از نظر موقعیت جغرافیایی نزدیک باشد تا امکان مقایسه نتایج وجود داشته باشد. با توجه به **شکل ۹** می توان دید که مقطع لرزه ای به دست آمده در ناحیه مزبور تا عمق ۲۸۰۰ m با نتایج مدل سازی داده های مگنتوتلوریک همخوانی قابل قبولی دارد ولی در عمق بیشتر از آن کیفیت ضعیفی دارد که روش مگنتوتلوریک آن را جبران می کند.

نتیجه گیری

در این مقاله، روش لنکزوس برای وارون سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک توسعه داده شده است. نتایج مدل سازی حاصل از یک مدل مصنوعی به کمک روش های لنکزوس و گرادیان مزدوج نشان می دهد که روش لنکزوس در هر دو حالت TM و



شکل ۸ مقطع توزیع پارامتر تنظیم λ



شکل ۹ مدل لرزه ای منطبق بر مدل به دست آمده با روش مگنتوتلوریک

مراجع

- [1]. Vozoff K (1987) The magnetotelluric method In: Nabighian, M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 2, SEG, Tulsa, OK, 641-707.
- [2]. Dobrin M D, Savit C H (1988) *Introduction to Geophysical Prospecting* 4th ed. McGraw-Hill, New York, 868.
- [3]. Sarvandani M M, Kalateh A N, Unsworth M, Majidi A (2017) Interpretation of magnetotelluric data from the Gachsaran oil field using sharp boundary inversion, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149: 25-39.
- [4]. Watts M D, Pince A (1998) Petroleum exploration in overthrust area using magnetotelluric and seismic data, SEG expanded abstract, New Orleans.
- [5]. Xiao W, Unsworth M (2006) Structural imaging in the Rocky Mountain Foothills (Alberta) using magnetotelluric exploration, *AAPG Bull*, 90: 321-333.
- [6]. Christopherson K R (1991) Applications of magnetotelluric to petroleum exploration in Papua New Guinea: a model for frontier area, *Lead. Edge*, 10: 21-27.
- [۷]. هاشمی ن (۱۳۹۱) وارون سازی داده های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری کپه داغ غربی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.
- [8]. Mansouri I, Oskooi B, Pedersen L (2015) Magnetotelluric signature of anticlines in Iran's Sehqanat oil field, *Tectonophysics*, 654, 1: 101-112.
- [۹]. البرزبان ش، مرادزاده ع، قائدرحمتی ر، نجاتی کلاته ع و کشکولی م (۱۳۹۷) مدل سازی دوبعدی مرزهای تیز داده های مگنتوتلوریک به منظور تشخیص ساختارهای هیدروکربوری منطقه گچساران، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۷: ۱۲-۱.
- [۱۰]. مطیعی، ه (۱۳۷۴) چینه شناسی زاگرس، انتشارات سازمان زمین شناسی کشور.
- [11]. Guoqiang X, Shaonan Z, Zhongdong L, Lailiang S, Huimin L (2007) Carbonate sequence stratigraphy of a back-arc basin: a case study of the qom formation in the kashan area, Central Iran, *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 81: 488-500.
- [12]. Ward S H, Hohmann G W (1991) *Electromagnetic theory for geophysical applications: electromagnetic methods in applied geophysics* 2, 3, Nabighian, M. N, Ed, SEG Investigations in geophysics, 131-311.
- [13]. Swift C M (1967) A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [14]. Lilley F E M (1976) Diagrams for magnetotelluric data, *Geophysics*, 41: 766-770.
- [15]. Reddy I K, Rankin D, Phillips R J (1977) Three-dimensional modeling in magnetotelluric and magnetic variational sounding, *Geophysical Journal International*, 51: 313-325.
- [16]. Kao D, Orr, D (1982) Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England, *Geophys, Geophysical Journal International*, 70, 2: 323-337.
- [17]. Caldwell T G, Bibby H, Brown C (2004) The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, 158: 457-469.
- [18]. Marti A, Queralt P, Ledo J (2009) WALDIM: A code for the dimensionality analysis of Magnetotelluric data using the rotational invariants of the Magnetotelluric tensor, *Comput. Geosci*, 35: 2295-2303.
- [19]. Krieger L, Peacock J R (2014) MTPy: a python toolbox for magnetotellurics, *Computers and Geosciences*, 72: 167-175.
- [20]. Aster R C, Borchers B, Thurber C H (2013) *Parameter estimation and inverse problems*, academic press.
- [21]. Tikhonov A N, Arsenin V Y (1977) *Solution of Ill-Posed Problems*, Wiley, New York, 258.
- [22]. Abedi M, Gholami A, Norouzi G H, Fathianpour N (2013) Fast inversion of magnetic data using Lanczos bidiagonalization method, *Journal of Applied Geophysics*, 90: 126-137.
- [23]. Calvetti D, Morigi S, Reichel L, Sgallari F (2000) An L-ribbon for large underdetermined linear discrete ill-posed problems, *Numer Algorithms*, 25: 89-107.
- [24]. Hestenes M R, Stiefel E (1952) Methods of conjugate gradients for solving linear systems, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49: 6: 409-436.
- [۲۵]. دهبان ی، نجاتی کلاته ع، رضایی م و میرزایی م (۱۳۹۸) تخمین و مدل سازی سه بعدی ضخامت رسوبات روی پی سنگ به منظور اکتشاف ذخایر هیدروکربن با استفاده از داده های ژئوفیزیکی منطقه جنوبی هلند، پژوهش نفت، ۱۰۵: ۱۳۵-۱۲۵.
- [26]. Nemeth T, Normark E, Qin F (1997) Dynamic smoothing in crosswell travelttime tomography, *Geophysics*, 62, 168-176.

- [27]. Sasaki Y (1989) Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, 54: 254–262.
- [28]. Yi M J, Kim J H, Chung S H (2003) Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, 68, 3: 931–941.
- [29]. Lee S K, Kim H J, Song Y, Lee C (2009) MT2DInvMatlab-A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion, *Computers and Geosciences*, 35: 1722-1734.



Two-dimensional Modeling of Magnetotelluric Data for Detection of Hydrocarbon Sources by Lanczos Bidiagonalization Method (Case Study: Kashan Region)

Faegheh Mina Araghi¹, Mirsattar Meshinchi-Asl^{1*}, Ali Nejati Kalateh², Mahmoud Mirzaei³

1. Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3. Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran

m.meshinchi@srbiau.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2021.4405.2997

Received: February/03/2021

Accepted: June/14/2021

Introduction

The magnetotelluric method is a geophysical method with a natural source that uses the surface measurement of the electric and magnetic fields of the earth to explore and identify subsurface structures. The Earth's naturally varying electric and magnetic fields are measured over a wide range of magnetotelluric frequencies from 10,000 Hz to 0.0001 Hz. The method can be used as a useful method in areas where the application of seismic method is difficult due to reasons such as severe topography of the area and the existence of large underground cavities. In the last decade, electromagnetic methods and MT specially have been used in the exploration of hydrocarbon reservoirs [1].

In Iran, MT method has also been applied in oil and gas exploration. MT survey was used in Gachsaran region in order to detect hydrocarbon structures. The model obtained by inversion showed the top of Asmari formation and anticlinal structures with good accuracy [2]. Magnetotelluric exploration was applied in the western Kope Dagh in 2008. The aim of this research were modeling and interpretation of magnetotelluric data to detect the hydrocarbon structures. The resistivity sections show a clear picture of the resistivity changes both laterally and with depth [3].

In the present work, for processing time series data

from Kashan area, the SSMT2000 software provided by Phoenix Geophysics Company was used. In the next step, by calculating the values of the impedance tensor (Z), the values of apparent resistivity and phase in the frequency domain are determined. After that, conjugate gradient and Lanczos inversion algorithms are implemented on synthetic and real data. Finally, to validate the results of the inverse modeling, the models recovered were compared with geological section.

Materials and Methods

The optimization process includes minimizing an objective function in order to achieve an optimal solution for the inverse problem. Iterative methods are commonly used for the optimization of nonlinear inverse problem [4]. In this study, we employed the fast iterative method of LB for 2D MT data. In addition, we tested CG method for the data to provide a comparison for LB. Both of them are iterative methods for approximate solution of large-scale and sparse linear system of equations. The objective function can be expressed as:

$$P(m) = \phi(m) + \lambda^2 s(m) \quad (1)$$

where $\phi(m)$ is the misfit functional, $s(m)$ is the stabilizing functional, and λ is the regularization parameter. After minimization of Equation (1), the following equation can be written:

$$\Delta m = (J^T J + \lambda^2 W^T W)^{-1} J^T \Delta d \quad (2)$$

where J is the jacobian matrix (matrix of first order partial derivatives), W is the Laplacian (second-order) operator and Δd is the error vector which refers to the difference between predicted and observed data [5]. In the process of inversion, firstly Δd and the Jacobian matrix (J) are computed using an initial model (m_r) which has been specified as a column vector of zero elements; then the stop criterion for the inversion is controlled. The iteration cycle will be stopped when the RMSE due to difference between observed data and model response is equal or less than the RMSE due to added noise. The model is updated using the changes in the estimated model:

$$m_{Up} = m_r + \Delta m \quad (3)$$

Equation 2 can be solved using the least squares method:

$$\min \left\| \begin{pmatrix} J \\ \lambda W \end{pmatrix} \Delta m - \begin{pmatrix} \Delta d \\ 0 \end{pmatrix} \right\|_2 \quad (4)$$

To update the model parameters and estimate their changes, the LB method was used. In this algorithm, the equation is replaced with a dimensionally reduced one; afterwards, the new equation is solved using the well-known approaches such as the least squares inversion.

Choosing the Regularized Parameter

In inverse modeling, we try to have a good estimate of the regularization parameter. However, it is not easy to find the best one. Large values for the

regularization parameter would apply more constraint or regularization to the solution and give poor resolution of the parameters. On the other hand, too small values of the parameter may be harmful to the stability of the inversion. An intermediate value must be chosen, compromising the resolution and the stability. This approach, however, neglects the fact that each parameter is not equally resolvable. Hence, varying the parameter is preferred to get both the resolution and the stability as the inversion converges [6]. Though, this approach can make the inverse problem more accurate than when using a fixed regularization parameter. An alternative to varying the parameter as the iterations proceed is to use the spatially varying regularization parameter [7]. The spatially variable regularization parameter algorithm which is called ACB (Active Constraint Balancing) was first introduced by Yi et al [8].

Inversion of Synthetic Data

In order to test the inversion method, a simple synthetic model consists of two different rectangular blocks was simulated. One of the blocks has 2×4 km dimension with an apparent resistivity of $10 \Omega.m$ which is buried at 2.5 km depth. While, the other one has 4×1.5 km dimension with an apparent resistivity of $100 \Omega.m$ which is buried at 1 km depth. For both of them a host medium with an apparent resistivity of $50 \Omega.m$ is used. Random Gaussian noise with a standard deviation of 2% of the data amplitude was added to the data. The results obtained are seen in Figures 1 and 2.

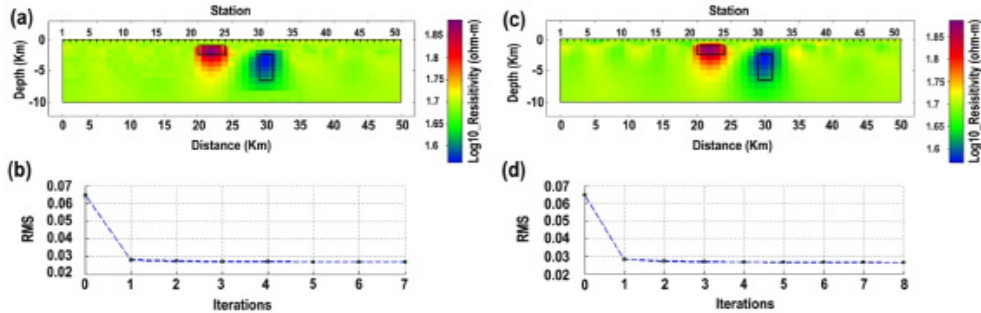


Fig. 1 The performance of the introduced methods for TM mode inversion of the synthetic example. Recovered models obtained by LB and CG methods are shown in (a) and (c), respectively. In addition, RMS of the models are presented in (b) and (d) for LB and CG, respectively

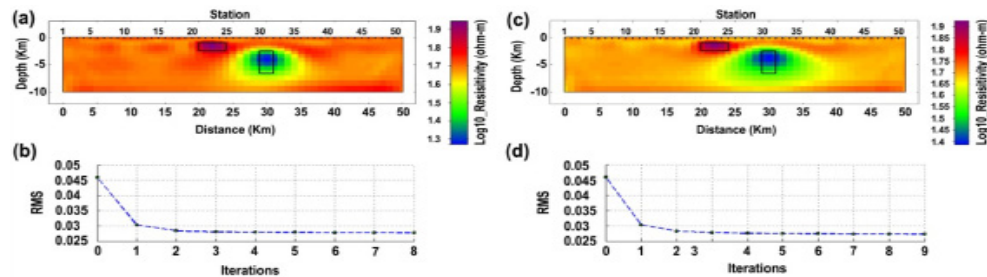


Fig. 2 The performance of the introduced methods for TE mode inversion of the synthetic example. Recovered models obtained by LB and CG methods are shown in (a) and (c), respectively. In addition, RMS of the models are presented in (b) and (d), for LB and CG, respectively.

Inversion of Real Data

The data from the Kashan area has been collected along a profile in northeast-southwest direction with 60 km length and 276 stations which the distance between the stations is 200 m. For each station horizontal components of magnetic and electric fields have been recorded. To obtain geophysical model of Kashan area from inversion of the collected data, LB

and CG algorithms were employed. Figure 3 shows the inversion results of real data. The apparent resistivities and phases obtained by LB are in better fit with the observed data than those obtained by CG. TM mode, a more reliable model from the subsurface structure retrieved by LB that was more closely in agreement with geology information of the zone compared to that achieved by CG.

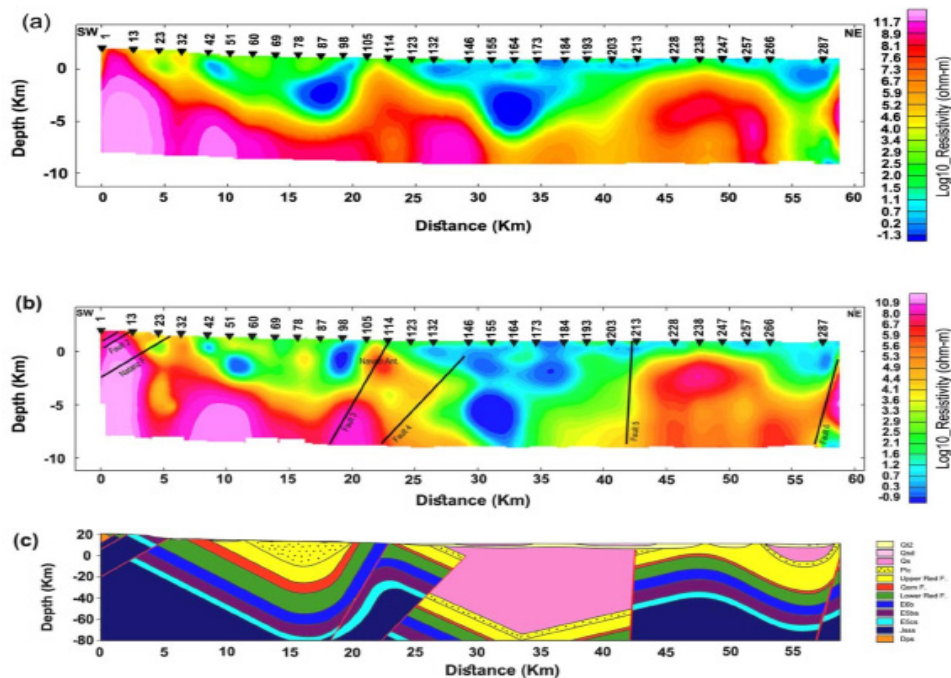


Fig. 3 The models of TM mode inversion of the field data recovered by CG algorithm (a) LB method (b) and geological section of the selected profile in the study area (c)

Conclusions

In this paper, the lanczos method is developed for two-dimensional inversion of magnetotelluric data. According to the results obtained for the inversion technique, the proposed method performed faster and better (in terms of quality of the results) for synthetic data compared to the other method (CG). We also applied the proposed method to real MT data of the Kashan area. The results of the inversion modeling obtained by LB indicate that the method is able to detect almost the exact positions of the available faults along the profile, Formations of the zone, upper boundary of Qom Formation and the anticline very well. From comparing seismic section and inverse modeling of the MT data, the conclusion can be drawn that the results of the MT method can be used for filling the lack of geological information of seismic survey.

Acknowledgments

We would like to thank National Iranian Oil Company for providing us with the field MT data. In addition, we are honored to thank particularly Mr. Ghomi, who helped to prepare the data set.

References

1. Dobrin, M.D, Savit C.H (1988) Introduction to Geophysical Prospecting 4th ed.McGraw-Hill, New York, 868.
2. Sarvandani M.M, Nejadi Kalateh A, Unsworth M, Majidi A (2017) Interpretation of magnetotelluric data from the Gachsaran oil field using sharp boundary inversion. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 149, 25–39.
3. Hashemi N (2012) Inversion of magnetotelluric data to explore the hydrocarbon structures of the western Kopeh Dagh, PhD thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
4. Chauhan M S, Fedi M, Sen M K (2018) Gravity inversion by the Multi-Homogeneity Depth Estimation method for investigating salt domes and complex sources. *Geophys. Prospect.*, 66: 175–191.
5. Aster R.C, Borchers B, Thurber C.H (2013) Parameter Estimation and Inverse Problems, Academic Press.
6. Nemeth T, Normark E, Qin F (1997) Dynamic smoothing in crosswell traveltome tomography, *Geophysics*, 62, 168–176

7. Sasaki Y (1989) Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, *Geophysics*, 54, 254–262.
8. Yi M J, Kim J H, Chung S H (2003) Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, 68, 3: 931–941.