

تحلیل بعد و امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک، مثال موردی از میدان نفتی سه‌قنات

عیسی منصوری*، شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب • بهروز اسکویی، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران • لاوست پدرسن، دانشگاه ایسلا سوند • رحمان جواهری، مدیریت اکتشاف

چکیده

روش مگنتوتلوریک از جمله تکنیک‌های اکتشافی ژئوفیزیکی است که با استفاده از میدان‌های طبیعی الکترومغناطیسی، قادر است تا اطلاعات مفیدی را از اعماق بسیار زیاد زمین دریافت نماید. مولفه‌های الکتریکی و مغناطیسی در مدت زمانی مشخص و در یک بازه فرکانسی گسترده اندازه‌گیری شده و پس از مراحل پردازشی به شکل تانسور امپدانس ذخیره می‌گردد. تانسور امپدانس حاوی اطلاعاتی از قبیل مقاومت ویژه الکتریکی، فاز و همچنین بُعد و امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی است. در مطالعه حاضر با ارائه روش‌های متنوعی که عمدتاً بر اساس تجزیه تانسور امپدانس می‌باشد، بُعد و امتداد یک ساختمان زمین‌شناسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش‌های مذکور شامل سوپرفیت اسکویو، باهر اسکویو، تجزیه تانسوری با رهیافت ژانگ و همچنین معرفی و کاربرد تابع تحلیلی (Q) است. ساختمان زمین‌شناسی مورد مطالعه، متشکل از یک نفتگیر تاقدیسی (تاقدیس سه‌قنات)، در جنوب غربی ایران و در حوضه رسوبی زاگرس می‌باشد. داده‌های مگنتوتلوریک در بیش از ۶۰۰ ایستگاه و در طول پنج پروفیل موازی با جهت جنوب غربی - شمال شرقی در منطقه مورد مطالعه برداشت شده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تانسور امپدانس در این پژوهش نشان داد که هندسه کلی و جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی را می‌توان با دقت بالایی از داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کرد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۴/۱۲/۰۴

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۶/۱۴

واژگان کلیدی:

تابع تحلیلی (Q)، تاقدیس سه‌قنات، تجزیه تانسور امپدانس، حوضه رسوبی زاگرس، مگنتوتلوریک

مقدمه

ایجاد اثر "لایه‌های رسانای دروغین" می‌شود، نام برد [۹]. تفسیر دو بُعدی داده‌های سه بُعدی نیز می‌تواند به تخمین کمتر از واقعیت رسانایی کل منجر شود [۱۰] و [۱۱]. تفسیر داده‌ها در یک سیستم غلط (در صورتی که داده‌ها در جهت امتداد صحیح ژئوالکتریکی برگردانده نشوند) باعث ایجاد ساختارهای نادرست در مدل نهایی می‌شود. بنابراین قبل از انجام هرگونه مدلسازی، تعیین بُعد و جهت امتداد داده‌های مگنتوتلوریک به منظور انتخاب روش وارون‌سازی اعم از یک بُعدی، دو بُعدی و یا سه بُعدی و همچنین چرخش دستگاه مختصات طبق زاویه استخراج شده از تجزیه تانسور امپدانس، ضروری است. در مطالعه حاضر نتایج تحلیل بُعد و جهت امتداد ساختار زمین‌شناسی تحت اکتشاف که تاقدیس نفتی سه‌قنات را در بر می‌گیرد، با روش‌های اسکویو سوپرفیت^۱، اسکویو باهر^۲، تجزیه تانسور امپدانس با رهیافت ژانگ^۳ و در نهایت تحلیل تابع (Q) ارائه خواهد شد.

۱- برداشت و پردازش داده‌های مگنتوتلوریک

داده‌های مگنتوتلوریک^۵ با تفکیک مکانی بسیار بالا در حوضه میدان نفتی سه‌قنات واقع در جنوب غربی ایران برداشت شده است. این داده‌ها طی مدت زمان یک سال و تحت نظارت مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران جمع‌آوری شده

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس بوده که در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای را در بین سایر روش‌های اکتشافی به خود اختصاص داده است. این روش یک تکنیک ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال^۱ است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین جهت بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیر سطحی استفاده می‌کند [۱]. در این روش امواج الکترومغناطیسی با توجه به فرکانس آنها و نیز مقاومت ویژه لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به دست می‌آورند. عمق بررسی در روش مگنتوتلوریک خیلی بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش می‌تواند جهت کاوش‌های زیرسطحی از اعماق ده‌ها متر تا ده‌ها کیلومتر به کار گرفته شود [۲] تا [۸]. از مهمترین و اساسی‌ترین مراحل تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک پیش از هرگونه مدلسازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- تحلیل بُعد ذاتی داده‌ها

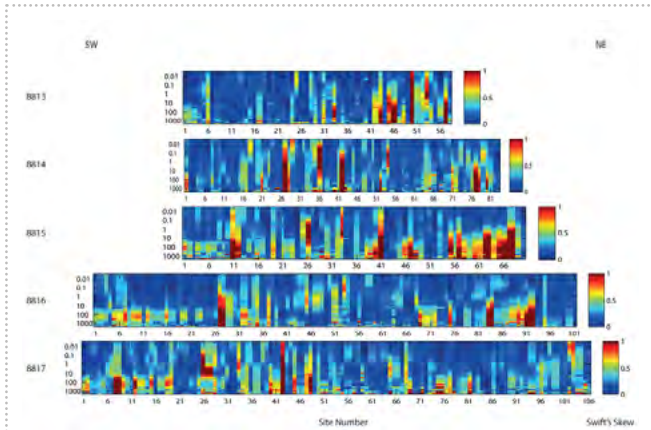
۲- تعیین جهت امتداد مناسب برای مدلسازی داده‌ها

محققان زیادی در چند دهه گذشته به نقاط ضعف موجود در تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک که در اثر تحلیل بُعد نادرست داده‌ها به وقوع می‌پیوندد، اشاره کرده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان از تفسیر یک بُعدی داده‌های دو بُعدی که باعث

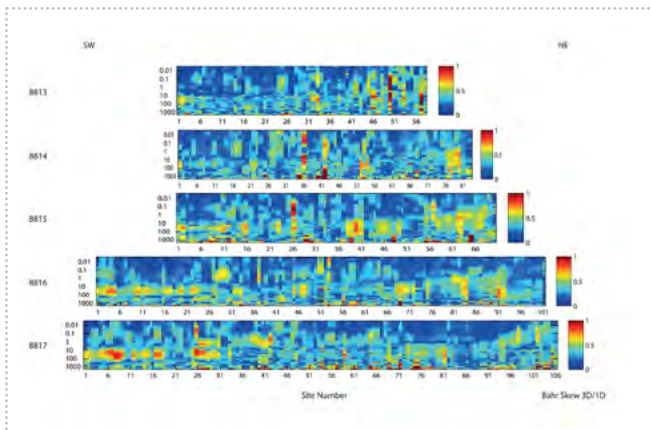
* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (mansoori.i@nisoc.ir)

تبدیل فوریه^۶ سریع انتخاب می‌شود، سپس ضرایب فوریه محاسبه شده و در نهایت با انجام تبدیل فوریه گسسته^۷،

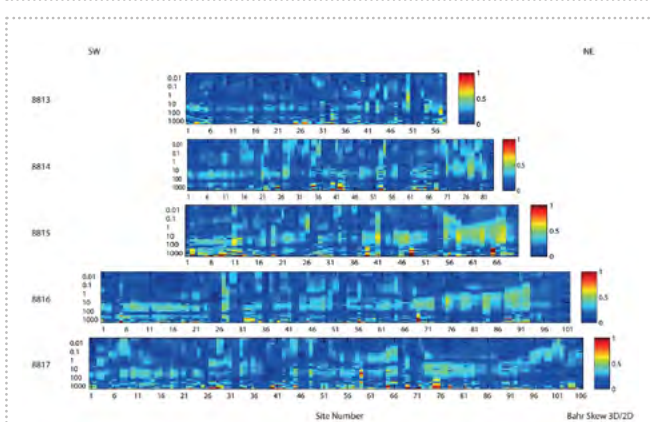
اطلاعات مذکور در محل بیش از ۶۰۰ ایستگاه و در طول پنج پروفیل موازی با اسامی ۸۸۱۳، ۸۸۱۴، ۸۸۱۵، ۸۸۱۶ و ۸۸۱۷ با جهت یافتگی شمال شرقی- جنوب غربی (عمود بر روند کلی زمین‌شناسی منطقه)، ثبت شده‌اند. فاصله بین پروفیل‌ها سه کیلومتر می‌باشد و فاصله تقریبی بین ایستگاه‌ها نیز ۳۰۰ متر بوده که در بعضی مناطق به دلیل عوارض طبیعی و مصنوعی تغییر کرده است (شکل-۱). پروفیل‌های مگنتولوریک به نحوی طراحی شده‌اند که به شکل عمود بر روند ظاهری ساختارهای منطقه‌ای (شمال غربی- جنوب شرقی) قرار گیرند. توابع تبدیل مگنتولوریک از طریق پردازش سری‌های زمانی مولفه‌های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) برداشت شده در عملیات صحرایی، به دست می‌آیند. تغییرات زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی داده‌های MT به شکل تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود. سری‌های زمانی در حافظه دستگاه برداشت داده‌ها ثبت شده و سپس در نرم‌افزارهای مربوطه مورد ارزیابی کنترل کیفی قرار می‌گیرند. در مرحله پردازش سری‌های زمانی، یک فاصله زمانی جهت انجام



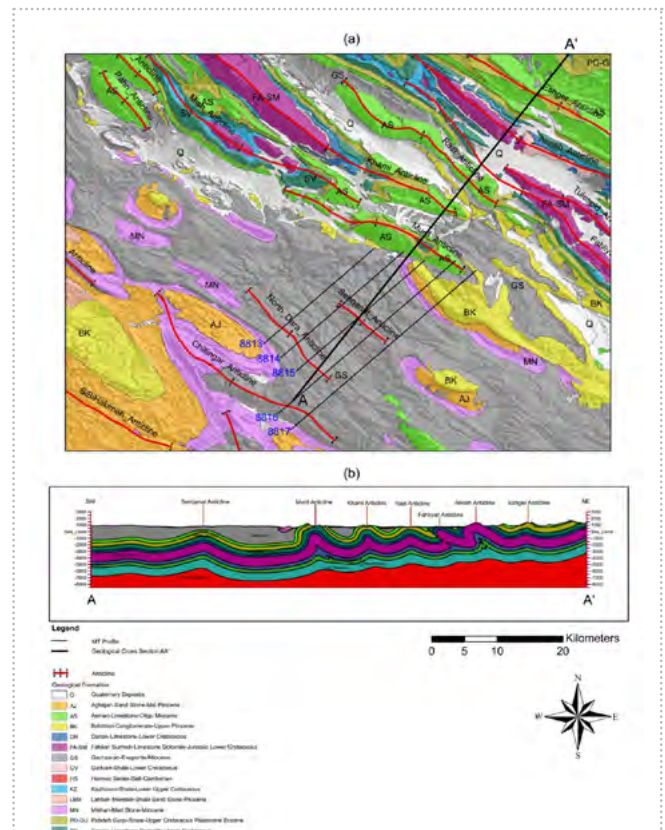
شکل ۲ | مقادیر اسکيو سويفت برای دوره‌های تناوب مختلف در امتداد پروفیل‌های مگنتولوریک میدان نفتی سه‌قنات



شکل ۳ | شکل (۳) مقادیر اسکيو حساس به فاز (3D/1D) باهر برای دوره‌های تناوب مختلف در امتداد پروفیل‌های مگنتولوریک میدان نفتی سه‌قنات



شکل ۴ | مقادیر اسکيو منطقه‌ای (3D/2D) باهر برای دوره‌های تناوب مختلف در امتداد پروفیل‌های مگنتولوریک میدان نفتی سه‌قنات؛ مقادیر بسیار پایین اسکيو تأییدکننده تقریب صحیح دویعدی زمین‌شناسی تحت‌الارضی منطقه مورد مطالعه است.



شکل ۱ | در قسمت (a) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه به‌همراه نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است. خطوط موازی سیاه‌رنگ موقعیت پروفیل‌های مگنتولوریک و خطوط قرمز رنگ موقعیت تاق‌دیس‌های منطقه را نشان می‌دهد. مقطع عرضی زمین‌شناسی در امتداد خط AA' در قسمت (b) آمده است (نقشه فوق نسخه رقومی شده نقشه‌های تولید شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور است).

۲- اسکیو حساس به فاز باهر، 3D/1D [۱۳]،

۳- اسکیو منطقه‌ای باهر، 3D/2D [۱۳]،

نتیجه‌گیری در مورد چگونگی هندسه ساختار تحت‌الارضی، با اعمال آستانه‌های معینی بر مقادیر پارامترهای فوق حاصل می‌شود. مقادیر کمتر از ۰/۲ برای اسکیو سوئیفت و با هر 3D/1D، نشان‌دهنده زمین یک‌بعدی یا دوبعدی است در حالی که مقادیر بیشتر از ۰/۳ حاکی از پیچیده‌تر شدن ساختارهای زمین‌شناسی است. چنانچه بین مقادیر اسکیو سوئیفت و اسکیو باهر 3D/1D تفاوتی عمده‌ای دیده شود، می‌توان نتیجه گرفت که این اختلاف در اثر بروز اعوجاج گالوانیکی است. در مورد اسکیو باهر 3D/2D نیز می‌توان گفت که آستانه ۰/۳ برای این پارامتر، تقریباً دوبعدی را توجیه می‌کند. مقادیر بیشتر اسکیو باهر 3D/2D، بیانگر حضور ساختارهای سه‌بعدی می‌باشد. مقادیر اسکیو سوئیفت (شکل-۲)، 3D/1D (شکل-۳) و 3D/2D (شکل-۴) باهر برای داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه‌قات نشان می‌دهد که به‌طور کلی زمین‌شناسی تحت‌الارضی منطقه مورد مطالعه دارای حالت دوبعدی است. اگر چه در تعدادی از ایستگاه‌ها و برخی دوره‌های تناوب، اثر ساختارهای سه‌بعدی و ناهمگنی‌های سطحی مقادیر بالای را در مورد هر سه پارامتر فوق‌الذکر نشان می‌دهد.

۳- مدل اعوجاج و تعیین جهت امتداد

بر اساس روش ارائه شده توسط ژانگ^۹ و همکاران [۱۴]، برای امپدانس محاسبه شده Z و به منظور تخمین امتداد ژئوالکتریکی یک ساختار دوبعدی همراه با ناهمگنی‌های سه‌بعدی محلی، تنها اعوجاج موجود در میدان الکتریکی لحاظ می‌شود.

$$Z = (I + P_h) Z^0 \quad (1)$$

در جایکه، Z^0 ، امپدانس منطقه‌ای بدون اعوجاج بوده، I ماتریس

طیف‌های توان متقابل^۸ به‌دست می‌آیند. در گام بعد مقادیر تانسور امپدانس را می‌توان در حوزه فرکانس محاسبه کرد.

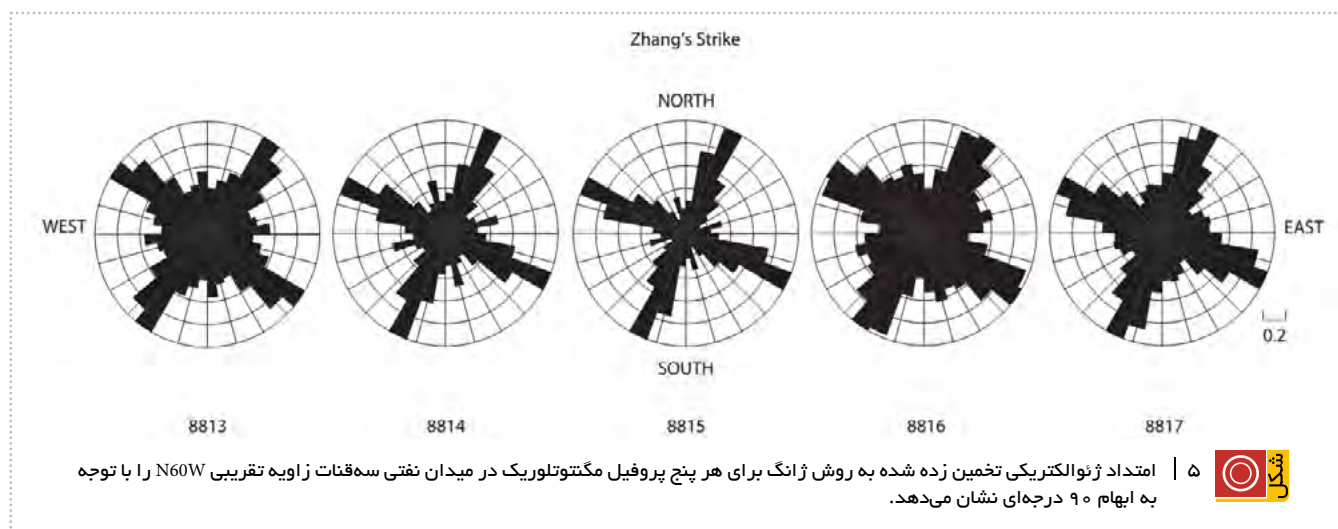
۲- تحلیل بُعد و اثر اعوجاج

تانسور امپدانس حاوی اطلاعاتی است که از طریق آن می‌توان بُعد ساختارهای مقاومت ویژه زیرسطحی را تخمین زد. تحلیل بُعد داده‌های مگنتوتلوریک قبل از انجام فرایند وارون‌سازی امری ضروری است. از ساده‌ترین ساختارهای مقاومت ویژه زمین، مدل نیم‌فضای لایه‌ای است. در این مدل یک‌بعدی، مولفه‌های قطری امپدانس صفر بوده و مولفه‌های غیرقطری نیز از نظر بزرگی با هم برابر اما دارای علامت مخالف، $Z_{xy} = -Z_{yx}$ می‌باشند. در مدل ایده‌آل دوبعدی، جایی که تنها یک جهت امتداد ژئوالکتریکی وجود دارد، تانسور امپدانس به دو مد مجزا تجزیه می‌شود؛ TE و TM. در یک سیستم مختصات صحیح، مولفه‌های قطری امپدانس صفر خواهند شد، هر چند در واقعیت به دلیل خطای محاسباتی در اثر برگرداندن سیستم مختصات، اعوجاج القایی یا گالوانیکی ناشی از ناهمگنی‌های سطحی، وجود نوفه و همچنین اثر ساختارهای سه‌بعدی این امر معمولاً اتفاق نمی‌افتد.

بنابراین قبل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک، انجام یک تحلیل بُعد دقیق و برآورد میزان اعوجاج موجود در داده‌ها جهت تقریب صحیح مدهای TE و TM با استفاده از Z_{xy} و Z_{yx} امری حیاتی است. روش‌های مختلفی برای تخمین بُعد داده‌های مگنتوتلوریک و همچنین ارزیابی ویژگی‌های پدیده اعوجاج، پیشنهاد شده است که از آنجمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- اسکیو سوئیفت [۱۲]،

کمیت اسکیو سوئیفت توسط اعوجاج گالوانیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرد.



۵ | امتداد ژئوالکتریکی تخمین زده شده به روش ژانگ برای هر پنج پروفیل مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قات زایوه تقریبی N60W را با توجه به ابهام ۹۰ درجه‌ای نشان می‌دهد.

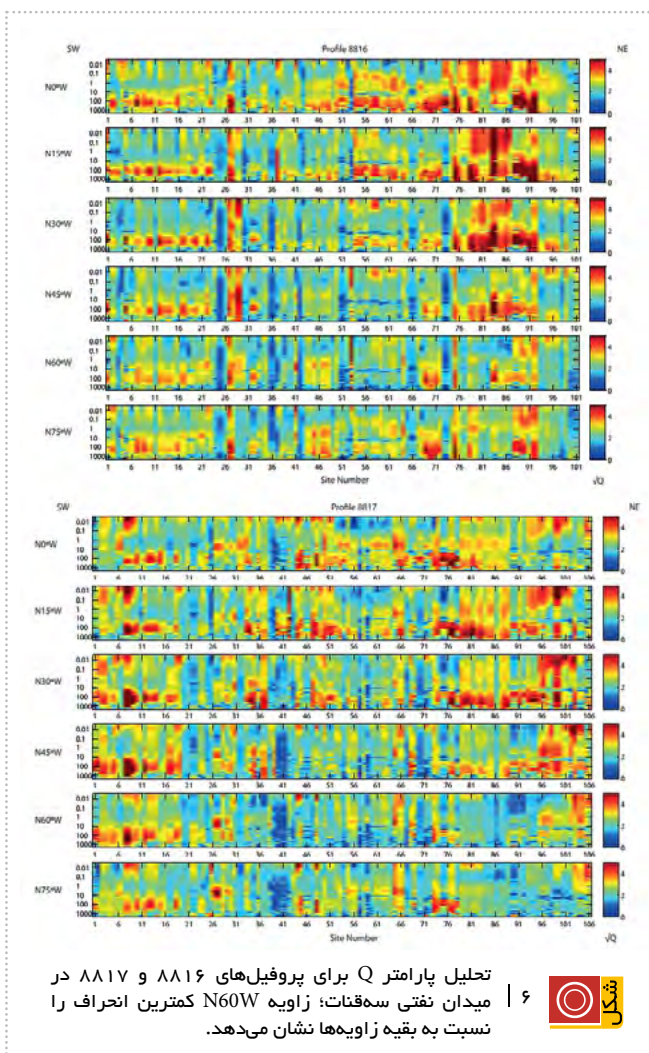


مورد مطالعه، زاویه تقریبی N60W را نشان می‌دهد (شکل-۵). به‌منظور برآورد هرچه دقیق‌تر امتداد ژئوالکتریکی ساختارهای تحت‌الارضی، تحلیل پارامتر Q برای داده‌های مگنتوتلوریک در طول پروفیل‌های مورد مطالعه و برای زاویه‌های N0W تا N75W با فواصل ۱۵ درجه‌ای انجام شد. مقادیر حاصل از تحلیل Q برای فواصل زمانی مختلف، در واقع میزان انحراف از زاویه امتداد مورد نظر را نشان می‌دهد و همانطور که به‌عنوان مثال برای پروفیل‌های ۸۸۱۶ و ۸۸۱۷ در شکل-۶ آورده شده است، زاویه N60W کمترین انحراف ممکن را نسبت به بقیه زاویه‌ها دارد.

کلیه محاسبات مربوط به تحلیل بُعد و جهت امتداد داده‌های مگنتوتلوریک برای تعداد ایستگاه‌ها و پروفیل‌های متعدد، در محیط متلب (MATLAB) کدنویسی شده است و شکل‌های نشان داده شده نیز در همین محیط تولید شده‌اند.

نتیجه‌گیری

از اساسی‌ترین مراحل تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک، تحلیل



شکل ۶ | تحلیل پارامتر Q برای پروفیل‌های ۸۸۱۶ و ۸۸۱۷ در میدان نفتی سه‌قنات؛ زاویه N60W کمترین انحراف را نسبت به بقیه زاویه‌ها نشان می‌دهد.

همانی^{۱۰} و ماتریس اعوجاج است که بیانگر اثر اعوجاج گالوانیکی و دارای مقادیر حقیقی و مستقل از فرکانس می‌باشد. جهت پیدا کردن امتداد دوبعدی منطقه‌ای، باید زاویه θ_r را از رابطه زیر تخمین زد:

$$Z(\theta_r) = \begin{bmatrix} P_{xy}Z_{yx}^0 & (1 + P_{xx}Z_{xy}^0) \\ (1 + P_{yy}Z_{yx}^0) & P_{yx}Z_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

برای یک مدل دوبعدی منطقه‌ای، مولفه‌های قطری تانسور امپدانس با مولفه‌های غیرقطری آن، توسط معادلات زیر با یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$Z_{xx}(\theta_r) = \beta Z_{yx}(\theta_r) \quad (3)$$

$$Z_{yy}(\theta_r) = \gamma Z_{xy}(\theta_r) \quad (4)$$

β و γ پارامترهای جابه‌جایی ایستا به‌شمار می‌روند که از فرکانس، مستقل بوده و با استفاده از روش کمترین مربعات، برای هر ایستگاه قابل محاسبه می‌باشند. سپس می‌توان بهترین زاویه امتداد منطقه‌ای، θ_r ، را با کمینه کردن تابع هدف Q، بین مولفه‌های غیرقطری پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده امپدانس و برای $N = N_p N_s$ (حاصلضرب تعداد طول موج‌ها در تعداد ایستگاه‌ها) تعداد داده با تغییر زاویه امتداد θ ، تخمین زد.

$$Q(\theta) = \frac{1}{4N - 2N_p - 1} \times \left(\sum_i \sum_j \left(\frac{1}{\sigma_{xxij}^2} \left| Z_{xxij}(\theta) - \beta_i Z_{yxij}(\theta) \right|^2 + \frac{1}{\sigma_{yyij}^2} \left| Z_{yyij}(\theta) - \gamma_i Z_{xyij}(\theta) \right|^2 \right) \right) \quad (5)$$

در معادله بالا، σ واریانس مولفه‌های قطری امپدانس یا یک مقدار کف خطا^{۱۱} می‌باشد که به‌عنوان درصدی از مولفه‌های غیرقطری امپدانس محاسبه می‌شود. اگرچه محاسبه دقیق P_{ij} امکان‌پذیر نیست اما پارامترهای β و γ ، اطلاعاتی را در مورد اثرات جابه‌جایی ایستا ارائه می‌دهند. یک تحلیل Q می‌تواند برای چندین زاویه امتداد θ انجام شود تا اینکه مشخص شود داده‌ها تا چه اندازه می‌توانند یک جهت امتداد معین را در طول یک پروفیل مگنتوتلوریک تأیید کنند. زاویه امتداد تخمین زده شده توسط این روش، دارای ۹۰ درجه ابهام است و برای تأیید صحت آن باید از اطلاعات تکمیلی دیگر مانند مشاهدات زمین‌شناسی منطقه‌ای، کمک گرفت. مقادیر θ_r از طریق روش ژانگ برای هر پنج پروفیل مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قنات تخمین زده شد. محاسبه پارامتر فوق با میانگین‌گیری از داده‌های سه ایستگاه مجاور و سه دوره تناوب متوالی و اعمال میزان کف خطای سه درصد انجام شده است. تخمین زاویه امتداد ژئوالکتریکی به روش فوق با در نظر گرفتن ابهام ۹۰ درجه‌ای و امتداد ظاهری شمال غربی-جنوب شرقی ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه

روش ارائه شده توسط ژانگ و تابع تحلیلی (Q) استفاده شد. مدلسازی جهت امتداد ژئوالکتریکی تاقدیس نفتی سه قنات به روش فوق با در نظر گرفتن ابهام ۹۰ درجه‌ای و امتداد ظاهری شمال غربی-جنوب شرقی ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه، زاویه تقریبی N60W را آشکار کرد. بنابراین قبل از انجام مدلسازی، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از پردازش داده‌های مگنتوتلوریک، دستگاه مختصات تانسور امپدانس در کلیه ایستگاه‌ها باید به میزان N60W چرخانده شود. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تانسور امپدانس در این پژوهش نشان می‌دهد که هندسه کلی و جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی برای اعمال در مراحل آتی تفسیر اطلاعات را می‌توان با دقت بالایی از داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کرد. ■

بعد و تعیین امتداد غالب ژئوالکتریکی این داده‌هاست. یک بُعدی، دو بُعدی و یا سه بُعدی بودن و همچنین تعیین جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی در این مرحله تخمین زده می‌شود. در مطالعه حاضر به منظور تحلیل بُعد داده‌های مگنتوتلوریک روش‌های متنوعی ارائه شد که از جمله می‌توان به رهیافت اسکویو سوئیفت، اسکویو باهر حساس به فاز و منطقه‌ای اشاره کرد. مقادیر کم پارامترهای مذکور برای داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه قنات نشان داد که اگرچه در تعدادی از ایستگاه‌ها و برخی دوره‌های تناوب، اثر ساختارهای سه بُعدی و ناهمگنی‌های سطحی مقادیر بالاتری را برای پارامتر اسکویو نشان می‌دهد اما به طور کلی زمین‌شناسی تحت‌الارضی ساختار مورد مطالعه دارای حالت دو بُعدی است. به منظور تعیین امتداد ژئوالکتریکی نیز از

پانویس‌ها

- | | | |
|--|-------------------------------------|---------------------|
| 1. Passive | 5. Spatial resolution | 9. Zhang |
| 2. Swift's skew | 6. Fast fourier transform (FFT) | 10. Identity matrix |
| 3. Bahr's skew | 7. Discrete fourier transform (DFT) | 11. Error floor |
| 4. Zhang's tensor decomposition scheme | 8. Cross-power spectra | |

منابع

- [1] Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 605-635.
- [2] Vozoff, K., 1991. The magnetotelluric method, in J. D. Corbett, ed., *Electromagnetic method in applied geophysics- Applications part A and part B: Society of Exploration Geophysicists*. 641-711.
- [3] Oskooi, B., 2004. A Broad View on the Interpretation of Electromagnetic Data (VLF, RMT, MT, CSTMT). *Acta Universitatis Upsaliensis. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 959. 68 pp. Uppsala. ISBN 91-554-5925-0.
- [4] Oskooi, B., Pedersen, L.B., Smirnov, M., Arnasson, K., Esteinsson, H., Manzella, A., the DGP working group, 2005. The deep geothermal structure of the Mid-Atlantic ridge deduced from MT data in SW Iceland. *Phys. Earth planet. Inter.* 150, 183-195.
- [5] Oskooi B, Darijani M 2013. 2D inversion of the magnetotelluric data from Mahallat geothermal field in Iran using finite element approach. *Arab. J. Geosci.* DOI 10.1007/s12517-013-0893-6.
- [6] Oskooi, B., Pedersen, L.B., Koyi, H.A., 2014. Magnetotelluric signature for the Zagros collision. *Geophys. J. Int.* 196, 1299-1310.
- [7] Oskooi, B., Mansoori, I., 2014. Iodine-bearing saline aquifer prospecting using magnetotelluric method in Golestan plain, NE Iran, *Arab J Geosci*, DOI:10.1007/s12517-014-1634-1.
- [8] Oskooi, B., Mansoori, I., Pedersen, L.B., Koyi, H.A., 2015. A magnetotelluric survey of ophiolites in the Neyriz area of southwestern of Iran. *Pure Appl. Geophys.* 172(2), 491-502.
- [9] Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I., 1976. Basic principles of interpretation of magnetotelluric curves. In: *Geoelectric and geothermal studies*. Adam, A., Ed., *Akademini Kiado*, 165-221.
- [10] Wannamaker, P.E., Hohmann, G.W., Ward, S.H., 1984. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earth. *Geophysics*, 49, 1517-1533.
- [11] Martinelli, P., Osella, A., and Pomposiello, C., 2000. Comparative magnetotelluric modeling of smooth 2D and 3D conducting bodies using Rayleigh-Fourier codes: *Pure Appl. Geophys.*, 157, 383-405.
- [12] Swift, C.M., 1967. A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [13] Bahr, K., 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types. *Physics of The Earth and Planetary Interiors* 66 (1-2), 24 - 38.
- [14] Zhang, P., Roberts, R.G., Pedersen, L.B., 1987. Magnetotelluric strike rules. *Geophysics*. 52(3), 267-278.