

وارون‌سازی دو و سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک به‌منظور اکتشاف ساختارهای هیدروکربنی در میدان نفتی سه‌قنات، جنوب غربی ایران

عیسی منصوری^۱، بهروز اسکویی^{۲*}، لاوست پدرسن^۳ و رحمان جواهری^۴

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

۳. استاد، بخش علوم زمین، دانشگاه ایپسلا، سوئد

۴. کارشناس ارشد، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ایران

(دریافت: ۹۴/۶/۲۹، پذیرش نهایی: ۹۵/۷/۲۷)

چکیده

کاربرد روش مگنتوتلوریک در زمینه اکتشافات هیدروکربوری در مناطقی که روش لرزه‌نگاری بازتابی با مشکلاتی مواجه شده، قابل توجه است. در همین راستا یک بررسی مگنتوتلوریک با حجم وسیع در میدان نفتی سه‌قنات متشکل از یک نفت‌گیر تاق‌دیس، و در حوضه رسوبی زاگرس واقع در جنوب غربی ایران برای به نقشه در آوردن ساختار ژئوالکتریکی منطقه صورت گرفت. سازند کربناته آسماری، سنگ مخزن و سازند تبخیری گچساران، سنگ‌پوش را تشکیل می‌دهد. در میدان نفتی سه‌قنات، رخ‌نمون سازند تبخیری گچساران که دارای خاصیت‌های موم‌سان (پلاستیک) و ناهمگن است، باعث شده است تا کیفیت داده‌های لرزه‌ای افت کند و تفسیر مقاطع لرزه‌ای برانبارش با مشکلاتی مواجه شود. نگاره‌های چاه‌پیمایی استخراجی از چاه اکتشافی سه‌قنات، به علت تباین مقاومت ویژه الکتریکی سازند گچساران با سازندهای زیرین، استفاده از روش مگنتوتلوریک را به‌مثابه مکمل داده‌های روش لرزه‌نگاری توجیه می‌کند. به‌منظور اعمال تصحیح جابه‌جایی پایا نیز، اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی در حوزه زمان صورت گرفته است. بررسی بُعد و امتداد داده‌های مگنتوتلوریک حاکی از وجود مقادیر متناهی از تاثیر ساختارهای سه‌بعدی در منطقه مورد تحقیق است. با وارون‌سازی دو و سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک، مرز سازندهای گچساران و آسماری به‌مانند تاق‌دیس نفتی سه‌قنات در مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی آشکار شده است. در مدل‌های پیش‌گفته، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در عبور از سازند گچساران به سازند آسماری با افزایش قابل‌ملاحظه‌ای همراه است. همبستگی مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی با مقاطع برانبارش لرزه‌ای تفسیر جامعی از تشکیلات زمین‌شناسی تحت‌الارضی میدان نفتی سه‌قنات میسر کرده و نقاط مبهم نتایج روش لرزه‌نگاری بازتابی مرتفع شده است.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی در حوزه زمان، حوضه رسوبی زاگرس، سازند آسماری، سازند گچساران، لرزه‌نگاری بازتابی، مگنتوتلوریک، میدان نفتی سه‌قنات، وارون‌سازی.

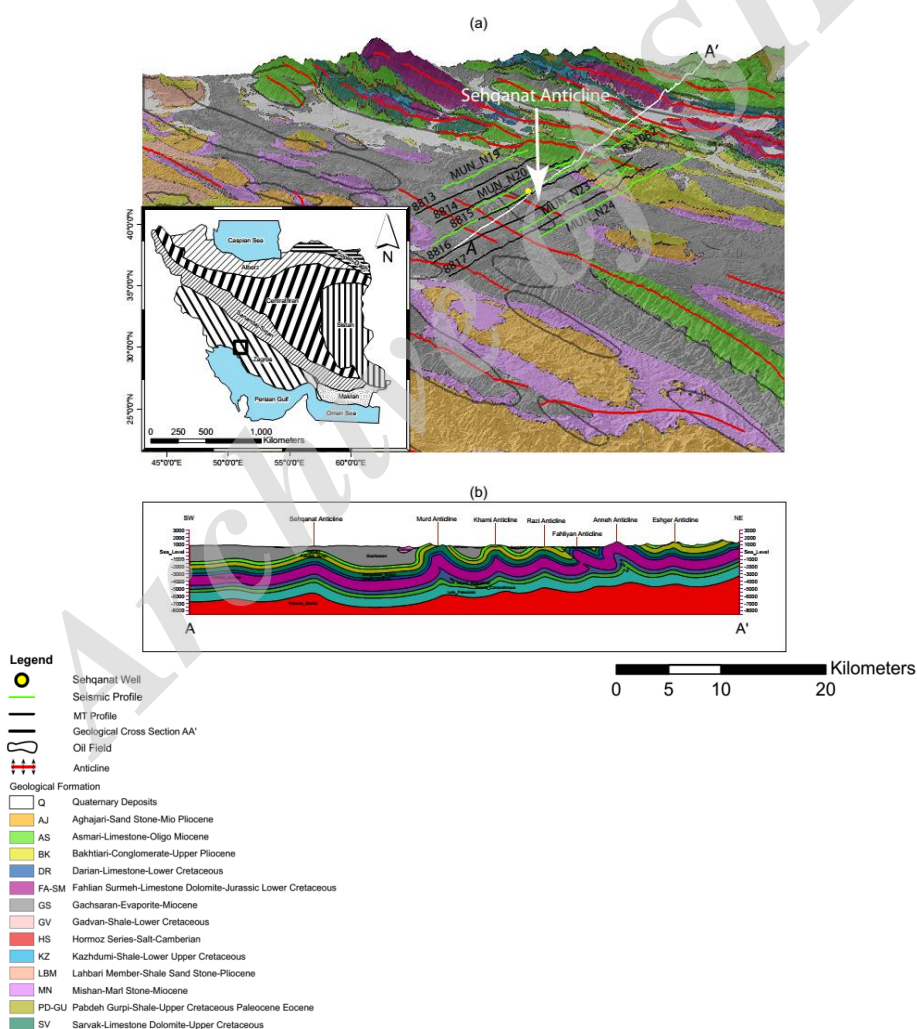
۱. مقدمه

لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به‌دست می‌دهند. عمق بررسی در روش مگنتوتلوریک خیلی بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش را می‌توان برای کاوش‌های زیرسطحی از اعماق ده‌ها متر تا ده‌ها کیلومتر به کار برد (ووزوف، ۱۹۹۱؛ اسکویی، ۲۰۰۴؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۰۵؛ اسکویی و دریجانی، ۲۰۱۳؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسکویی و منصوری، ۲۰۱۴؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۱۵؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). وجود تباین در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است که در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای را در بین سایر روش‌های اکتشافی به خود اختصاص داده است. روش مگنتوتلوریک به‌لحاظ چشمه فرستنده، جزء روش‌های غیرفعال است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین به‌منظور بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند (کانیارد، ۱۹۵۳). در این روش امواج الکترومغناطیسی با توجه به بسامد آنها و نیز مقاومت ویژه

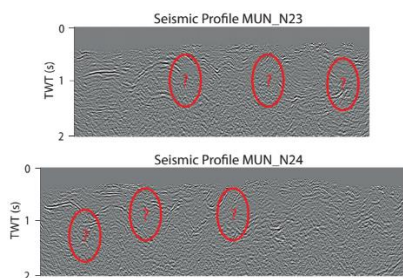
در گذر از لایه‌ها و ساختارهای زیرسطحی بهترین هدف اکتشافی برای روش مگنتوتلوریک محسوب می‌شود. کاربرد روش فوق در زمینه اکتشاف‌های هیدروکربوری نیز قابل توجه است و این امر در مناطقی که روش لرزه‌نگاری بازتابی با مشکلاتی مواجه می‌شوند، اهمیت بیشتری دارد. در مواردی که سطح زمین از لایه‌هایی ناهمگن، دارای خاصیت‌های موم‌سان و با سرعت موج لرزه‌ای زیاد پوشیده شده باشد، کیفیت داده‌های لرزه‌ای بازتابی به شدت تضعیف می‌شود و در بسیاری از موارد غیر قابل تفسیر می‌شوند (اورنج، ۱۹۸۹؛ ہمیش و تراواسوس، ۱۹۹۲؛ وارن و سرنکا، ۱۹۹۲؛ هوورستن،

۱۹۹۶؛ وارن، ۱۹۹۶؛ تراواسوس و منزس، ۱۹۹۹؛ مارتینی و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژیانو و آنسورث، ۲۰۰۶؛ پاندی و همکاران، ۲۰۰۸؛ منصوری و همکاران، ۲۰۱۵). میدان نفتی سه‌قنات واقع در جنوب غربی ایران از جمله میدان‌هایی است که هم‌اکنون تحت بررسی‌های اکتشافی تکمیلی قرار دارد (شکل ۱). افق هدف در این میدان، سازند کربناته آسماری است که در حکم سنگ پوش، در زیر سازند تبخیری گچساران قرار گرفته است. سازند آسماری به‌مثابه بزرگ‌ترین و درعین حال کم‌عمق‌ترین افق تولید نفت در جنوب غربی ایران شناخته می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی (مربع مشکی‌رنگ) در نقشه زمین‌شناسی ساختمانی ایران نشان داده شده است. موقعیت میدان نفتی سه‌قنات در کنار میدان‌های نفتی مجاور با حلقه‌های مشکی‌رنگ بسته در نقشه زمین‌شناسی (a) دیده می‌شود؛ خطوط موازی مشکی‌رنگ موقعیت نیم‌رخ‌های مگنتوتلوریک، خطوط سبز رنگ موقعیت خطوط لرزه‌نگاری، خطوط سرخ رنگ موقعیت تقادیس‌های منطقه و دایره زرد رنگ محل چاه اکتشافی سه‌قنات را نشان می‌دهد. مقطع عرضی زمین‌شناسی در امتداد خط AA' در قسمت (b) آمده است.

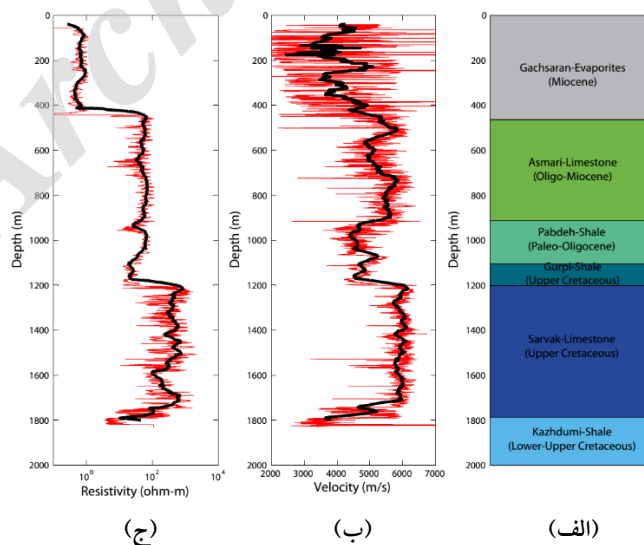
باعث ایجاد واپیچش و جابه‌جایی پایا در داده‌های مگنتوتلوریک شود. بنابراین به‌منظور تصحیح خطاهای احتمالی حاصل از رویداد پیش‌گفته، داده‌های الکترومغناطیسی در حوزه‌ی زمان (*TDEM*) نیز در کنار ایستگاه‌های مگنتوتلوریک برداشت شده است. روش *TDEM* به علت استفاده از خاصیت القای مغناطیسی تا حد بسیار زیادی عاری از واپیچش ناشی از محیط‌های ناهمگن است و از این رو می‌توان آن را مرجع مناسبی برای تصحیح داده‌های مگنتوتلوریک به شمار آورد. تصحیح پیش‌گفته را می‌توان با جابه‌جایی و انطباق خم‌های مقاومت ویژه‌ی ظاهری مگنتوتلوریک با خم‌های داده‌های *TDEM* عملی ساخت (ژیراسک، ۱۹۹۰).



شکل ۲. مقاطع لرزه‌نگاری دو‌بعدی در میدان نفتی سه‌قنات؛ کیفیت پائین این داده‌ها تفسیر زمین‌شناسی تحت‌الارضی را سخت کرده است. موقعیت مقاطع فوق در شکل ۱ آمده است.

داده‌های لرزه‌ای طی چند مرحله و در طول نیم‌رخ‌های گوناگونی برداشت شده است اما نتایج حاصل از پردازش آنها، کیفیت موردنظر برای تفسیر دقیق زمین‌شناسی را ندارد و به همین سبب از روش مگنتوتلوریک در حکم روش مکمل استفاده شده است (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). برای نمونه دو مقطع لرزه‌نگاری دو‌بعدی از منطقه مورد بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است و همان‌طور که دیده می‌شود در بسیاری از موارد، ردیابی لایه‌ها و پدیده‌های زمین‌شناسی موردنظر عملاً غیرممکن به نظر می‌رسد.

رخ‌نمون سازند تبخیری گچساران که دارای خاصیت‌های موم‌سان، ناهمگنی و سرعت موج لرزه‌ای زیاد است، باعث افت کیفیت داده‌های لرزه‌ای شده است. از طرف دیگر اطلاعات به‌دست آمده از نگارهای چاه‌پیمایی در چاه اکتشافی سه‌قنات (شکل ۳) و همچنین چاه‌های اطراف نشان‌دهنده تباین زیاد مقاومت ویژه الکتریکی بین سازندهای گچساران و آسماری است که هدف ایدئالی برای روش مگنتوتلوریک محسوب می‌شود (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). ناهمگن بودن سازند گچساران از جمله عواملی است که می‌تواند



شکل ۳. توالی چینه‌شناختی سازندهای حفاری شده (الف) در کنار نگارهای سرعت موج کشسان، (ب) و مقاومت ویژه الکتریکی و (ج) استخراج شده از چاه اکتشافی سه‌قنات؛ نوسان‌های شدید در نگار سرعت موج آکوستیک، بیانگر ناهمگن بودن سازند گچساران است که از سطح تا عمق حدود ۵۰۰ متر ادامه دارد. تباین چشمگیر مقاومت ویژه الکتریکی در دو عمق حدود ۵۰۰ و ۱۲۰۰ متر دیده می‌شود که در انطباق با مرز سازندهای گچساران-آسماری و پابده گورپی-سروک است.

برخورد پیش گفته تشکیل شده است که اکنون به شکل تاقدیس های مرتفع و کوههایی با قله های بلند که ارتفاع آنها گاه به ۳۶۰۰ متر بالای سطح دریا نیز می رسد، دیده می شوند. در ۱۹۰۸ اولین بار در یکی از همین تاقدیس ها (در شهر مسجد سلیمان)، عملیات اکتشاف نفت به موفقیت رسید و از آن پس تلاش های زیادی برای پی جویی های بیشتر صورت گرفته است.

در حال حاضر، حوضه رسوبی زاگرس یکی از بزرگ ترین ذخائر هیدروکربنی جهان شناخته می شود و هر ساله تعداد زیادی عملیات اکتشافی ژئوفیزیکی به منظور پی جویی مخازن جدید در آن در حال اجرا است. بیشترین ذخائر نفتی و گازی حوضه زاگرس در ارتباط با مخازن آهکی و کربناته است (مطیعی، ۱۹۹۵).

مهم ترین این مخازن، سازند آسماری با سن الیگو-میوسن است که بعد از آن سازند سروک (گروه بنگستان) با سن آلبین-کامپنین اهمیت ویژه ای دارد. مخازن عمیق تری نیز در این حوضه تشکیل شده است که از جمله می توان به تشکیلات آهکی-دولومیتی گروه خامی با سن ژوراسیک-کرتاسه پایینی و همچنین سازند کربناته دالان با سن پرمین اشاره کرد. در این بین، سازند آسماری از جمله مخازن عظیم جهان به شمار می رود که ضخامتی متغیر از چند متر تا بیش از ۵۰۰ متر را در بر می گیرد. این سازند عمدتاً از آهک های متراکم و همچنین دولومیت تشکیل شده است. روی افق بالایی سازند آسماری، تشکیلات تبخیری سازند گچساران قرار گرفته است که شامل صدها متر انیدریت، نمک و مقدار اندکی آهک و شیل است. این سازند تبخیری، سنگ پوش ایدئالی برای حفظ ذخائر هیدروکربنی سازند آسماری محسوب می شود (مطیعی، ۱۹۹۵) و تقریباً بیش از ۹۰ درصد سطح منطقه مورد بررسی را پوشانده است. در قاعده سازند آسماری تشکیلات شیلی سازندهای پابده و گورپی قرار دارد که به نوعی هم به منزله سنگ منشا مخزن آسماری و هم سنگ پوش دیگر مخزن کربناته یعنی سازند سروک، قلمداد می شود. در بخش زیرین سازند سروک

با پیشرفت های قابل ملاحظه ای که اخیراً در ساخت تجهیزات، روش های پردازشی و سرعت محاسبات رایانه ای رخ داده است، مدل سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک نیز امکان پذیر شده است. روش های وارون سازی سه بعدی قادرند با استفاده از ابزارهای ریاضیاتی و براساس مولفه های الکترومغناطیسی برداشت شده در سطح، ساختارهای تحت الارضی زمین شناسی را به شکل مدل های مقاومت ویژه الکتریکی عرضه کنند. در ادامه نتایج تحلیل بُعد و امتداد ژئوالکتریکی به همراه مدل های دو و سه بعدی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از وارون سازی داده های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه-قنات عرضه می شود.

۲. زمین شناسی میدان نفتی سه قنات

کشور ایران به لحاظ زمین شناسی ساختمانی به هفت ناحیه البرز، ایران مرکزی، کپه داغ، مکران، سیستان، سندج سیرجان و زاگرس تقسیم می شود (شکل ۱). بیش از ۹۵ درصد میدان های نفتی ایران در ناحیه زاگرس واقع شده است. این منطقه در اثر رسوب گذاری مداوم و فقط با وقفه هایی اندک، از زمان تریاس تا میوسن شکل گرفته است. نبود پدیده های آتشفشانی و دگرگونی، پراکندگی اندک رُخ نمون سنگ های پالئوزوئیک و تعدد تاقدیس های بزرگ در کنار ناودیس های کوچک از دیگر ویژگی های زمین شناسی ناحیه زاگرس محسوب می شود.

منطقه زاگرس در قسمت های شمال غربی، غربی و جنوب غربی ایران و کرانه شرقی خلیج فارس قرار دارد. امتداد زمین شناسی آن شمال غربی - جنوب شرقی است و گستره ای بالغ بر ۱۵۰۰ کیلومتر را در بر می گیرد. ناحیه زاگرس در مرز صفحات قاره ای اوراسیا و عربی واقع شده است و به سبب کوهزایی حین دوران سنوزوئیک در اثر همین برخورد، شکل گرفته است (تاکین، ۱۹۷۲؛ آگارد و همکاران، ۲۰۰۵). تعداد بسیار زیادی از چین های موازی و هم امتداد شمال غربی-جنوب شرقی در اثر

می‌گیرد. داده‌های مگنتوتلوریک با تفکیک مکانی بسیار زیاد 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 است. اطلاعات پیش‌گفته در محل بیش از ۶۰۰ ایستگاه و در طول پنج نیم‌رخ موازی با اسامی ۸۸۱۳، ۸۸۱۴، ۸۸۱۵، ۸۸۱۶ و ۸۸۱۷ با جهت یافتگی شمال شرقی-جنوب غربی (عمود بر روند کلی زمین‌شناسی منطقه)، ثبت شده است. فاصله بین نیم‌رخ‌ها سه کیلومتر و فاصله تقریبی بین ایستگاه‌ها نیز ۳۰۰ متر است که در بعضی مناطق به علت عوارض طبیعی و مصنوعی تغییر کرده است (شکل ۱). سونداژهای *TDEM* نیز در بیش از ۴۰۰ ایستگاه و در طول نیم‌رخ‌های پیش‌گفته برداشت شده‌اند. نیم‌رخ‌های مگنتوتلوریک به‌نحوی طراحی شده‌اند که به شکل عمود بر روند ظاهری ساختارهای منطقه‌ای قرار بگیرند. همچنین، این طراحی با در نظر گرفتن نتایج خطوط لرزه‌نگاری دوبعدی برداشت شده در منطقه مورد بررسی صورت گرفته و سعی شده است به‌منظور امکان مقایسه بین داده‌های لرزه‌ای و مگنتوتلوریک، تا حد ممکن به این خطوط نزدیک باشد؛ ضمن اینکه تنها چاه اکتشافی میدان نفتی سه‌قنات نیز دقیقاً در قسمت میانی نیم‌رخ ۸۸۱۵ واقع شده است. تابع‌های تبدیل مگنتوتلوریک از راه پردازش سری‌های زمانی مولفه‌های الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) برداشت شده در عملیات صحرائی، به‌دست می‌آید. تغییرات زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی داده‌های *MT* به شکل تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود. سری‌های زمانی در حافظه دستگاه برداشت داده‌ها ثبت می‌شود و سپس در نرم‌افزارهای مربوط مورد ارزیابی کنترل کیفی قرار می‌گیرد. از جمله موارد کنترلی داده‌ها، شکل ظاهری سری‌های زمانی خام، طیف بسامدی و همچنین هم‌دوسی بین جفت مولفه‌های الکتریکی و مغناطیسی متعامد است. در مرحله پردازش سری‌های زمانی، یک فاصله زمانی به‌منظور اعمال تبدیل فوریه

نیز سازند عمده تا شیلی کژدمی نهشته شده است که در واقع عمده‌ترین سنگ منشا در حوضه رسوبی زاگرس به شمار می‌رود (مطیعی، ۱۹۹۵). نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی، در بردارنده رُخ‌نمون سطحی سازندهای موجود به‌همراه جنس و سن زمین‌شناسی آنها، امتداد برآوردی تاقدیس‌های منطقه، موقعیت نیم‌رخ‌های مگنتوتلوریک و همچنین مقطع عرضی زمین‌شناسی در راستای خط AA' در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که در مقطع عرضی زمین‌شناسی نیز دیده می‌شود، از سمت جنوب غربی به طرف شمال شرقی، هم‌زمان با پیچیده‌تر شدن ساختارها، چندین تاقدیس کوچک و بزرگ به چشم می‌خورد که البته هندسه و موقعیت آنها دقیق نیست و براساس اطلاعات کلی تحت‌الارضی به نقشه درآمده‌اند.

۳. برداشت و پردازش داده‌های مگنتوتلوریک

برداشت داده‌های مگنتوتلوریک در منطقه مورد بررسی، با اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی در دو جهت افقی (E_x و E_y) و مغناطیسی در دو جهت افقی (H_x و H_y) و یک جهت عمودی (H_z) صورت گرفته است. جهت x مطابق با جهت شمال مغناطیسی و میزان زاویه انحراف آن از شمال جغرافیایی حدود 3° است. مولفه‌های افقی میدان الکتریکی، روی سطح زمین، به‌شکل متعامد و با استفاده از دو جفت الکترودهای غیر قابل قطبش (حاوی $PbCl_2$) اندازه‌گیری شده است. E_x و E_y با اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل، ΔV ، بین جفت الکترودها محاسبه می‌شود، بدین صورت که $E = \Delta V/d$ درحالی که d فاصله بین الکترودها است. مولفه‌های افقی و عمودی میدان مغناطیسی نیز روی سطح زمین و از پیچه‌های مغناطیس‌سنج القایی اندازه‌گیری می‌شود. به‌منظور کاهش سطح نوفه در اثر تغییرات دمایی روزانه و همچنین باد، دو مغناطیس‌سنج افقی در زمین دفن می‌شود. ثبت تغییرات میدان مغناطیسی عمودی، H_z ، نیز با قرار دادن مغناطیس‌سنج به شکل عمودی در زمین و دفن هرچه بیشتر آن در جهت ارتقای کیفیت داده‌ها، صورت

مگنتوتلوریک، تحلیل بُعد و تعیین امتداد غالب ژئوالکتریکی این داده‌ها است. یک بُعدی، دو بُعدی و یا سه بُعدی بودن و همچنین تعیین جهت امتداد ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی در این مرحله برآورد می‌شود. در راستای تحلیل بُعد داده‌های مگنتوتلوریک روش‌های متنوعی عرضه شده است که از جمله می‌توان به رهیافت چاوله (اسکیو سوئیفت) (Skew Swift) (سوئیفت، ۱۹۶۷) اشاره کرد. کمیت چاوله سوئیفت از معادله (۳) محاسبه می‌شود؛

$$\kappa = \frac{|S_1|}{|D_2|} \quad (3)$$

$$S_1 = Z_{xx} + Z_{yy} \quad \text{and} \quad D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}$$

نتیجه‌گیری در مورد چگونگی هندسه ساختار تحت‌الارضی، با اعمال آستانه‌های معینی بر مقادیر کمیت κ حاصل می‌شود. بدین ترتیب که مقادیر کمتر از ۰/۲ برای چاوله سوئیفت، نشان‌دهنده زمین یک بُعدی یا دو بُعدی است در حالی که مقادیر بیشتر از ۰/۳ حاکی از پیچیده‌تر شدن و حالت سه بُعدی ساختارهای زمین‌شناسی است. مقادیر چاوله سوئیفت (شکل ۵) برای داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه قنات نشان می‌دهد که به‌طور کلی زمین‌شناسی تحت‌الارضی منطقه مورد بررسی دارای حالت دو بُعدی است. با این حال در تعدادی از ایستگاه‌ها و برخی دوره‌های تناوب، اثر ساختارهای سه بُعدی و ناهمگنی‌های سطحی، مقادیر زیاد پارامتر چاوله سوئیفت را نشان می‌دهد.

سریع انتخاب می‌شود، سپس ضریب‌های فوریه محاسبه می‌شود و در نهایت با تبدیل فوریه گسسته (Discrete Fourier Transform (DFT))، طیف‌های توان متقابل (Cross-power spectra) به دست می‌آید. در گام بعد و با محاسبه مقادیر تانسور پاگیری (امپدانس) Z_{ij} (معادله ۱)، می‌توان مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز در حوزه بسامد را از راه معادله‌های (۲) محاسبه کرد.

$$Z_{xx} = \frac{\langle E_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle E_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle}{\langle H_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle H_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle} \quad (1)$$

$$Z_{xy} = \frac{\langle E_x H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle E_x H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}{\langle H_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle H_y H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}$$

$$Z_{yx} = \frac{\langle E_y H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle E_y H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle}{\langle H_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle H_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle}$$

$$Z_{yy} = \frac{\langle E_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle E_y H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}{\langle H_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle H_y H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}$$

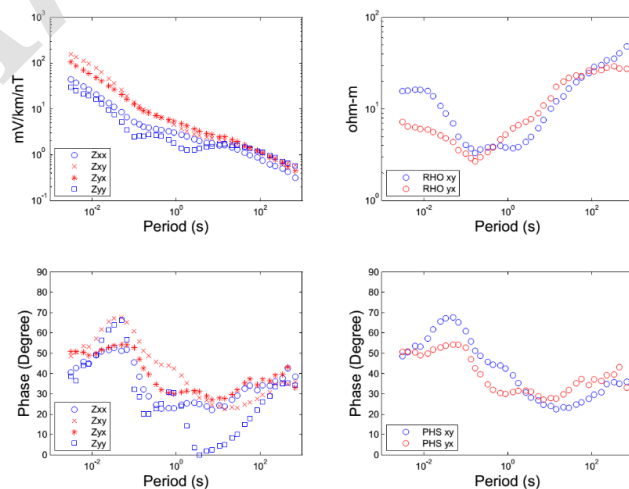
$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} |\hat{Z}_1|^2 = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \quad (2)$$

$$\frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad \text{and} \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im} \hat{Z}_1}{\text{Re} \hat{Z}_1} \right)$$

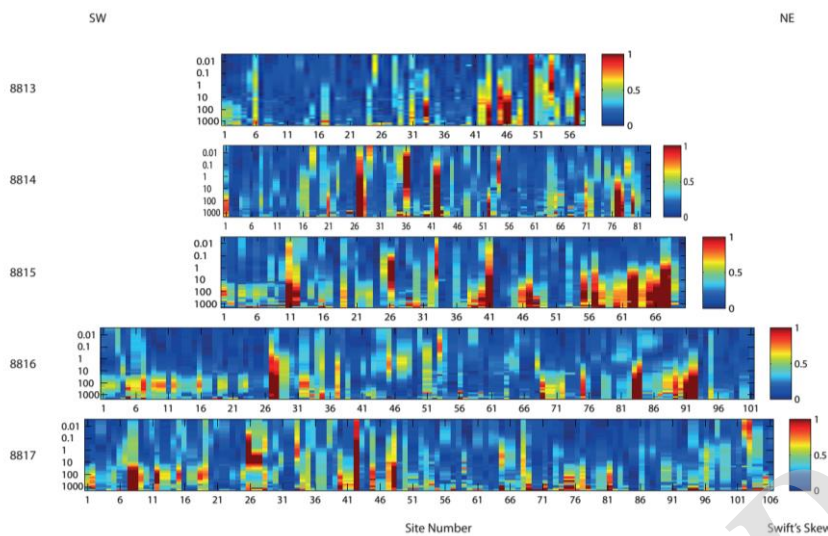
یک نمونه از داده‌های مگنتوتلوریک پردازش شده میدان نفتی سه قنات، در قالب بزرگی و فاز مولفه‌های پاگیری در شکل ۴ آمده است. نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری و فاز محاسبه شده از مولفه‌های پاگیری پیش‌گفته نیز در همین شکل، نشان داده شده است.

۴. تحلیل بُعد و تعیین امتداد ژئوالکتریکی

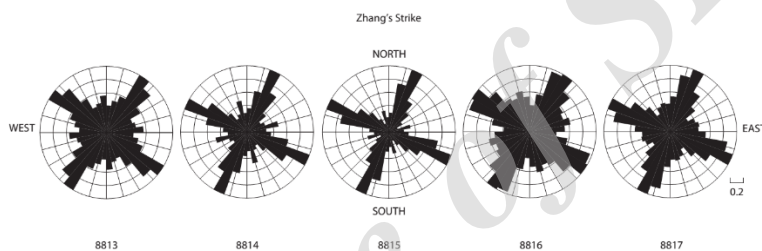
از مهم‌ترین و ابتدایی‌ترین مراحل تفسیر داده‌های



شکل ۴. نمونه‌ای از داده‌های مگنتوتلوریک پردازش شده در میدان نفتی سه قنات؛ در نمودارهای سمت چپ، چهار مولفه تانسور پاگیری به همراه فاز آنها نشان داده شده است و در نمودارهای سمت راست، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز محاسبه شده از مولفه‌های پاگیری در دو جهت اندازه‌گیری xy (منطبق با جهت شمال جنوب) و yx (منطبق با جهت شرق غرب) دیده می‌شود.



شکل ۵. مقادیر چاوله سویت برای دوره‌های تناوب گوناگون در امتداد نیم‌رخ‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه‌قنات؛ مقادیر زیاد چاوله حاکی از وجود ساختارهای سه‌بعدی محلی و واپیچش ناشی از ناهمگنی‌های سطحی است.



شکل ۶. امتداد ژئوالکتریکی برآورد شده به‌روش ژانگ برای هر پنج نیم‌رخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قنات زاویه تقریبی $N60W$ را با توجه به ابهام ۹۰ درجه‌ای نشان می‌دهد.

منطقه مورد بررسی، زاویه تقریبی $N60W$ را نشان می‌دهد (شکل ۶).

۵. وارون‌سازی دو‌بعدی و سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک با توجه به تجزیه و تحلیل‌های مقدماتی صورت گرفته درخصوص داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه‌قنات که شامل مواردی همچون تحلیل بُعد و بررسی جهت امتداد ژئوالکتریکی داده‌ها می‌شود، مدل‌سازی دو و سه‌بعدی در دستور کار قرار گرفت. در همین راستا و پس از اجرای کلیه مراحل پردازشی اولیه، داده‌های مگنتوتلوریک در قالب مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز در محدوده دوره تناوب ۰/۰۰۳ تا ۱۰۰۰ ثانیه برای وارون‌سازی، مهیا شد. تعداد کل ایستگاه‌های مورد استفاده در وارون‌سازی دو‌بعدی بالغ بر ۵۴۰ عدد و در

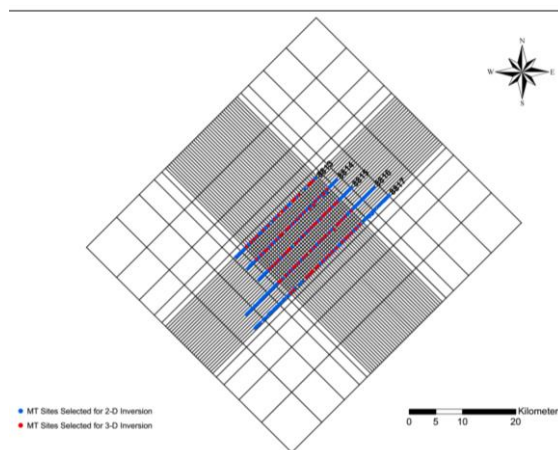
به‌منظور تعیین امتداد ژئوالکتریکی، از روش عرضه شده ژانگ و همکاران (۱۹۸۷) استفاده شده است. زاویه امتداد برآورد شده در این رهیافت، دارای ۹۰ درجه ابهام است و برای تأیید صحت آن باید از اطلاعات تکمیلی دیگر، مانند مشاهدات زمین‌شناسی منطقه‌ای، کمک گرفت. مقادیر زاویه امتداد ژئوالکتریکی به روش ژانگ برای هر پنج نیم‌رخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قنات برآورد کرد (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). محاسبه پارامتر فوق با میانگین‌گیری از داده‌های سه ایستگاه مجاور و سه دوره تناوب پی‌درپی و اعمال میزان کف خطای سه درصد صورت گرفته است.

برآورد زاویه امتداد ژئوالکتریکی به‌روش فوق با در نظر گرفتن ابهام ۹۰ درجه‌ای و امتداد ظاهری شمال‌غربی- جنوب‌شرقی ساختارهای زمین‌شناسی در

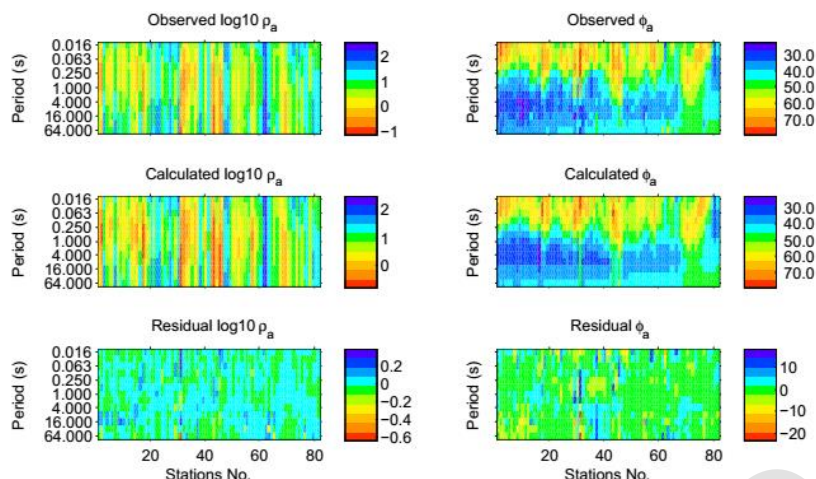
مگنتوتلوریک مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از روش تفاضل‌های محدود و شبکه مستطیلی برای گسسته‌سازی فضای مدل استفاده می‌کنند و روش وارون‌سازی اکام (کانستبل و همکاران، ۱۹۸۷) را به‌منظور پیدا کردن یک مدل هموار به کار می‌گیرند. مزیت اصلی روش‌های فوق، اجرای فرایند وارون‌سازی در فضای داده است که حجم محاسباتی مسئله را به‌نحو چشمگیری کاهش می‌دهد. به‌منظور پایدار و همگرا کردن محاسبات وارون‌سازی، از داده‌های لرزه‌ای در حکم مدل اولیه حاوی اطلاعات کلی از هندسه ساختارهای تحت‌الارضی به‌خوبی بهره گرفته شد. همگرایی وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی با حداقل خطای میانگین مربعات (rms) در چند تکرار اول حاصل شد که این امر نشان‌دهنده پایدار بودن فرایند وارون‌سازی داده‌ها است. مقادیر rms برای وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب $1/2$ و $2/2$ و بیان‌کننده برازش قابل قبول داده‌های محاسبه شده و مشاهده شده است (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز مشاهده شده، داده‌های محاسبه شده و باقی‌مانده، تفاوت آنها برای مدل دترمینان و در طول نیم‌رخ ۸۸۱۵ در شکل ۸ آمده است. شکل ۹ مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از وارون‌سازی دوبعدی را برای پنج نیم‌رخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قنات نشان می‌دهد. مرز سازندهای گچساران و آسماری و همچنین هندسه تاق‌دیس سه‌قنات در این مدل‌ها آشکار شده است.

وارون‌سازی سه‌بعدی به علت افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات ۱۰۰ عدد است که در طول پنج نیم‌رخ موازی با امتداد جنوب غربی-شمال شرقی واقع شده‌اند. موقعیت ایستگاه‌های انتخاب شده برای وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۷ و به ترتیب بارنگ‌های آبی و سرخ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، ایستگاه‌های مورد استفاده برای وارون‌سازی سه‌بعدی، به‌نحوی انتخاب شده‌اند که علاوه بر پوشش یکنواخت، بر قسمت میانی نیم‌رخ‌ها که منطبق بر محل تاق‌دیس سه‌قنات است، متمرکز باشند.

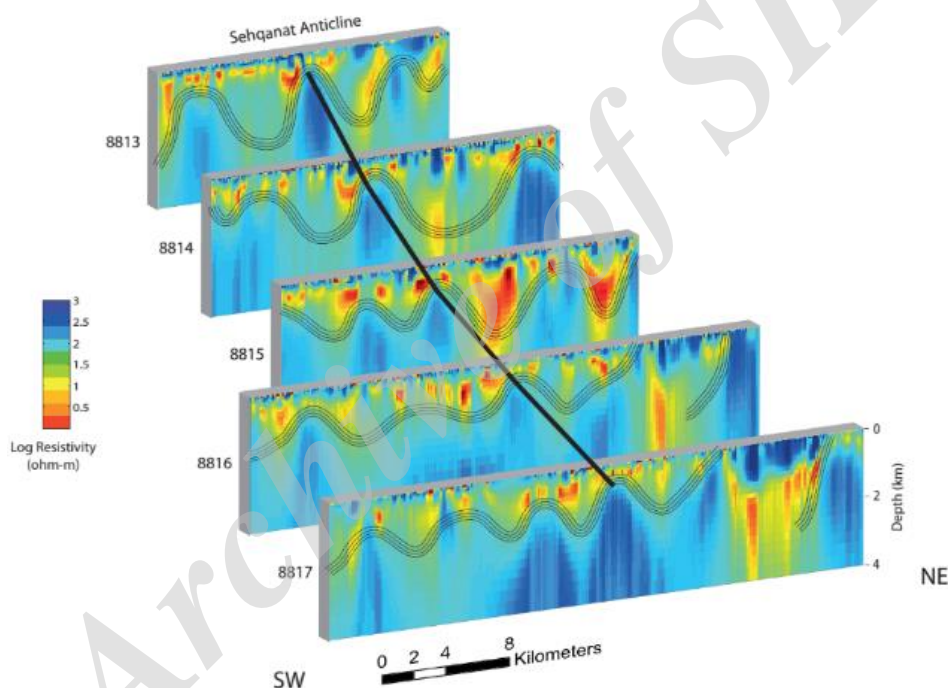
به‌منظور درک واقعی‌تر از هندسه و خصوصیات ژئوالکتریکی تشکیلات زمین‌شناسی تحت‌الارضی، وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک برای پاگیری، دترمینان (پدرسن و انگلس، ۲۰۰۵) صورت گرفته است. پاگیری دترمینان، میانگینی از مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز را در دو جهت اندازه‌گیری xy (منطبق با جهت شمال-جنوب) و yx (منطبق با جهت شرق-غرب) به‌دست می‌دهد و اثرات ناشی از وجود ساختارهای سه‌بعدی محلی و واپیچش ناهمگنی‌های سطحی را تا حد زیادی تضعیف می‌کند. هر دو الگوریتم‌های $REBOCC$ (سیریون و اراپورن و اگبرت، ۲۰۰۰؛ ارتقا یافته از سوی پدرسن و انگلس، ۲۰۰۵) و کالشوئر و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) و $WSINV3DMT$ (سیریون و اراپورن و اگبرت، ۲۰۰۰) که در این تحقیق و به ترتیب برای وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های



شکل ۷. شبکه طراحی شده برای وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه‌قنات؛ تراکم سلول‌ها در قسمت میانی منطقه مورد بررسی، بیشتر شده است.



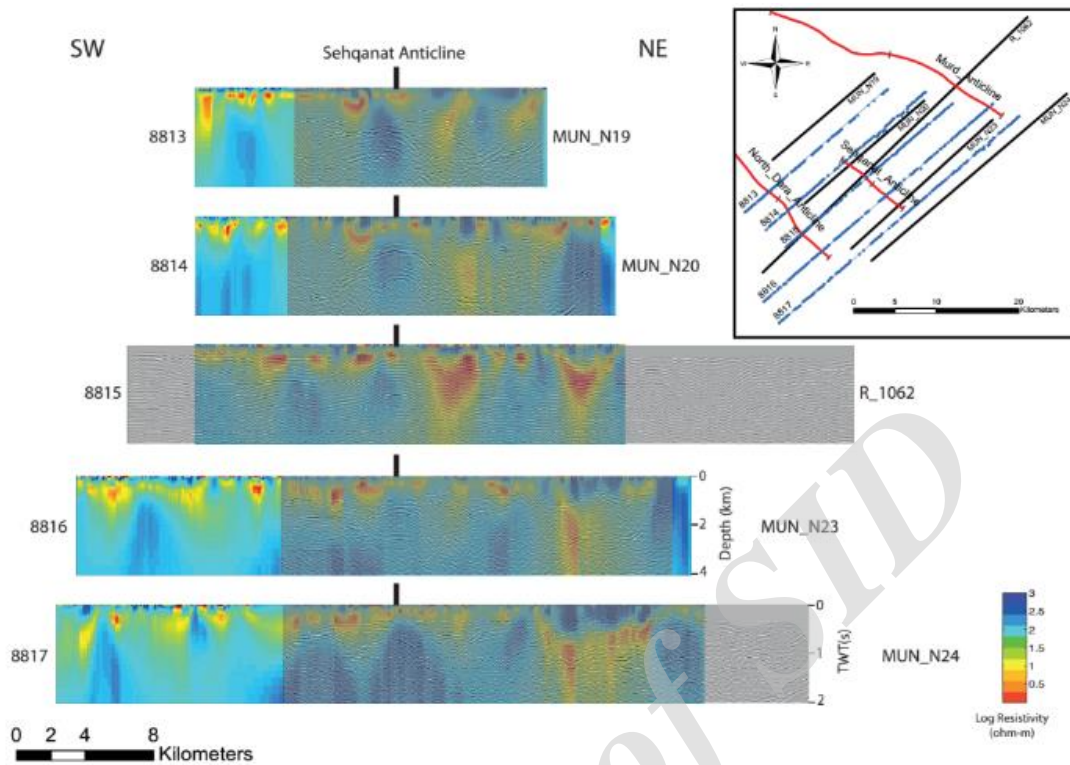
شکل ۸. مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز مشاهده شده (قسمت بالایی)، داده‌های محاسبه شده (قسمت میانی) و باقی‌مانده تفاوت آنها (قسمت پایینی) برای مد درمیان در طول نیم‌رخ ۸۸۱۵



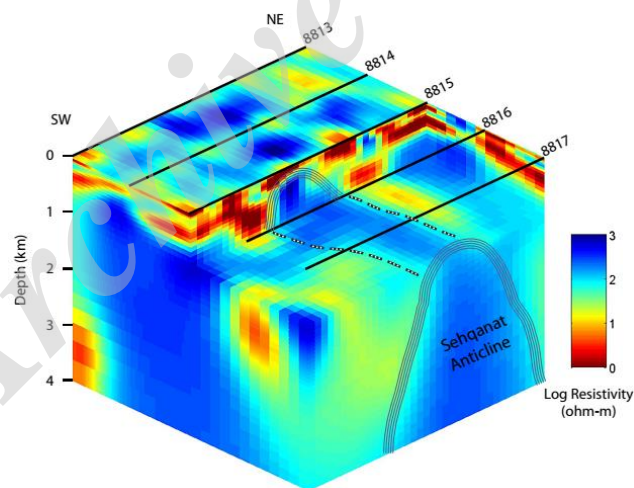
شکل ۹. مقاطع دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی داده‌های مد درمیان برای پنج نیم‌رخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سه‌قنات

ساختارهای سه‌بعدی محلی که منجر به ایجاد پدیده واپیچش نیز می‌گردند به شکل خودکار تضعیف شده و مدل مقاومت ویژه نهایی، نقشه واقعی تری از تشکیلات زیرسطحی را به دست می‌دهد. مدل نهایی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌ها در قالب یک مکعب سه‌بعدی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ساختارهای ژئوالکتریکی تحت‌الارضی انسجام بیشتر، و هندسه تاقدیس سه‌قنات نیز پیوستگی بهتری دارد.

همبستگی و تطابق زیاد مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی با مقاطع برانبارش لرزه‌ای در شکل ۱۰ به‌خوبی قابل رویت است. این امر نشان می‌دهد که با تلفیق نتایج روش مگنتوتلوریک و لرزه‌نگاری می‌توان نقاط مبهم موجود در امر تفسیر ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی تحت‌الارضی را تا حد مطلوبی مرتفع کرد (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). در فرایند وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک، اثرات ناشی از ناهمگنی‌های سطحی و



شکل ۱۰. تطابق مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌ای در میدان نفتی سه‌قنات.



شکل ۱۱. مدل نهایی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک میدان نفتی سه‌قنات؛ تاقدیس سه‌قنات در قسمت میانی نیم‌رخ‌ها به‌وضوح آشکار شده است.

۶. نتیجه‌گیری

تاقدیس سه‌قنات به‌کمک مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی است. تجزیه و تحلیل صورت گرفته درخصوص بُعد و امتداد ژئوالکتریکی داده‌ها نشان داد که ساختارهای زمین‌شناسی منطقه‌ای به‌شکل کلی دو‌بُعدی است، اگر چه اثر برخی ساختارهای محلی سه‌بُعدی نیز دیده می‌شود. در همین راستا وارون‌سازی دو

داده‌های مگنتوتلوریک با تفکیک مکانی زیاد در میدان نفتی سه‌قنات و به‌منظور تصویرسازی از ساختارهای زمین‌شناسی تحت‌الارضی برداشت شد. اهداف اصلی تحقیق حاضر شامل به‌نقشه درآوردن مرز زمین‌شناسی سازندهای گچساران و آسماری و همچنین هندسه

استفاده از نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی به شکل مطلوبی برطرف شود.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران بابت در اختیار دادن همه اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی را دارد. از بخش علوم زمین دانشگاه ایسلاوی سوئد نیز برای پذیرش مولف اول به عنوان محقق مهمان به مدت شش ماه و در اختیار گذاشتن سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مرتبط قدردانی می‌شود.

مراجع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005, Convergence history across Zagros, Iran; constraints from collisional and earlier deformation, *Int. J. Earth Sci.*, 94, 401-419.
- Beamish, D. and Travassos, J. M., 1992, Magnetotelluric imaging of basalt-covered sediments, *First Break*, 10(9), 345-357.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635.
- Constable, S. C., Parker, R. L. and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, 52(3), 289-300.
- Hoversten, G. M., 1996, Papua New Guinea MT: looking where seismic is blind, *Geophysical Prospecting*, 44, 935-961.
- Jiracek, G., 1990, Near surface and topographic distortions in electromagnetic induction, *Surv. Geophys.* 11, 163-203.
- Kalscheuer, T., Garcia, M., Meqbel, N. and Pedersen, L. B., 2010, Non-linear model error and resolution properties from two-dimensional single and joint inversions of direct current resistivity and radiomagnetotelluric data, *Geophys. J. Int.*, 182(3), 1174-1188.
- Kalscheuer, T., Hübert, J., Kuvshinov, A., Lochbuehler, T. and Pedersen, L. B., 2012, A hybrid regularization scheme for the inversion of magnetotelluric data from natural and controlled sources to layer and distortion parameters, *Geophysics*, 77(4), 301-315.
- Mansoori, I., Oskooi, B. and Pedersen, L. B., 2015, Magnetotelluric signature of anticlines

- و سه‌بعدی داده‌ها صورت گرفت و مرز سازندهای گچساران و آسماری در مدل‌های مقاومت ویژه الکتریکی آشکار شد. مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی در عبور از سازند گچساران به سازند آسماری با افزایش قابل‌ملاحظه‌ای تفکیک شده است و در همین راستا تاقدیس نفتی سه‌قنات نیز به‌شکل یک ساختار با مقاومت ویژه زیاد دیده می‌شود. تطابق و همبستگی بین مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی با مقاطع برانبارش لرزه‌ای روشن ساخت که با تفسیر هم‌زمان نتایج روش‌های گوناگون ژئوفیزیکی، می‌توان به تفسیری دقیق و جامع از زمین‌شناسی زیرسطحی دست یافت. این امر منجر شد تا نقاط ضعف ناشی از کیفیت کم داده‌های لرزه‌ای، با
- in Iran's Sehqanat oil field, *Tectonophysics*, 654, 101-112.
- Mansoori, I., Oskooi, B., Pedersen, L. B. and Javaheri, R., 2016, Three-dimensional modelling of magnetotelluric data to image Sehqanat hydrocarbon reservoir in southwestern Iran, *Geophysical Prospecting*, 64, 753-766.
- Martini, F., Hobbs, R. W., Bean, C. J. and Single, R., 2005, A complex 3D volume for sub-basalt imaging, *First Break*, 23, 41-51.
- Motiei, H., 1995, Geology of Iran, petroleum geology of Zagros, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Orange, A. S., 1989, Magnetotelluric exploration for hydrocarbons, *Proceedings of the IEEE* 77, 287-317.
- 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.
- Oskooi, B., Pedersen, L. B., Smirnov, M., Arnasson, K., Esteinsson, H. and 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.
- Oskooi, B. and 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.
- Oskooi, B., Pedersen, L. B. and Koyi, H. A., 2014, Magnetotelluric signature for the Zagros collision, *Geophys. J. Int.*, 196, 1299-1310.

- Oskooi, B. and 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.
- Oskooi, B., Mansoori, I., Pedersen, L. B. and Koyi, H. A., 2015, A magnetotelluric survey of ophiolites in the Neyriz area of southwestern of Iran, Pure Appl. Geophys., 172(2), 491-502.
- Pandey, D., MacGregor, L., Sinha, M. and Singh, S., 2008, Feasibility of using the magnetotelluric method for subbasalt imaging at Kachchh, India, Applied Geophysics., 5(1), 74-82.
- Pedersen, L. B. and Engels, M., 2005, Routine 2-D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor, Geophysics, 70, 33-41.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data, Geophysics, 65, 791-803.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, Ph.D. Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Takin, M., 1972, Iranian geology and continental drift in the Middle East, Nature, 235, 147-150.
- Travassos, J. M. and Menezes, P. T. L., 1999, Geoelectric structure beneath limestones of the Sao Francisco Basin, Brazil. Earth Planets Space, 51, 1047-1058.
- 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.
- Warren, R. K. and Srnka, L. J., 1992, Exploration in the basalt-covered areas of the Columbia River Basin, Washington, using electromagnetic array profiling (EMAP), Geophysics, 57(8), 986-993.
- Warren, R. K., 1996, A few case histories of subsurface imaging with EMAP as an aid to seismic processing and interpretation, Geophysical Prospecting, 44, 923-934.
- Xiao, W. and Unsworth, M., 2006, Structural imaging in the Rocky Mountain Foothills (Alberta) using magnetotelluric exploration, AAPG Bulletin, 90(3), 321-333.
- Zhang, P., Roberts, R. G. and Pedersen, L. B., 1987, Magnetotelluric strike rules, Geophysics, 52(3), 267-278.

Archive

2-D and 3-D inversion of the magnetotelluric data to explore hydrocarbon structures in the Sehqanat oil field, SW Iran

Mansoori, I.¹, Oskooi, B.^{2*}, Pedersen, L. B.³ and Javaheri, R.⁴

1. Ph.D.. Graduated, Institute of Geophysics, Department of Earth Physics, University of Tehran, Iran

2. Associate Professor, Institute of Geophysics, Department of Earth Physics, University of Tehran, Iran

3. Professor, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden

4. M.Sc. Graduated, Exploration Directorate of National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

(Received: 20 Sep 2015, Accepted: 18 Oct 2016)

Summary

Among all the geophysical techniques, the magnetotelluric method has improved considerably in recent years and is widely being used in hydrocarbon exploration especially in regions where reflection seismic has difficulties. Areas which are covered with high velocity rocks in the near surface are most popular cases. A huge high resolution magnetotelluric investigation was conducted in the Sehqanat oil field, SW of Iran, in 2013 to map geoelectrical structure of the region from surface down to several kilometers. The Sehqanat oil field is located in sedimentary Zagros zone which encompasses more than 95 percent of Iran's oil fields. The main geological interface which is targeted to be imaged with magnetotelluric method, due to the large resistivity contrast (based on the well logs information), is the contact between the highly conductive evaporites of Gachsaran formation and the more resistive underlying carbonates of Asmari formation. Regarding the large thickness of the high-velocity (ca. 4500 m/s) and heterogeneous Gachsaran Formation outcropping in the Sehqanat oil field and several adjoining oil fields in the study area, imaging of the underlying layers is difficult with the reflection seismic technique. On the other hand, the big contrast of the electrical resistivity between the Gachsaran Formation and the underlying layers is favourable for MT exploration. The geoelectrical contrast is well documented from the full-set log measured along the explorative Sehqanat well. The high velocity and very heterogeneous Gachsaran formation is exposed on the surface and has a varying thickness from 500 meter to more than two kilometers in the region and also covers the Asmari formation which is the main reservoir in SW oil fields of Iran, as a cap rock. Geologically, the Sehqanat oil field has been formed by a gentle and moderate-size anticline called "Sehqanat" which its structural shape, due to the low quality of reflection seismic data, is not clearly known for geologists. The Sehqanat anticline acts as a structural oil trap from aspect of the petroleum geology. In order to collect more geophysical information about the subsurface morphology of the Gachsaran-Asmari formations boundary as well as Sehqanat anticline, broadband magnetotelluric data were acquired at more than 600 stations along five parallel southwest-northeast profiles crossing the main geological trend of the study area. Transient electromagnetic data were also acquired over 400 stations along the mentioned profiles to be used for static correction of magnetotelluric data. Dimensionality and strike analysis of the MT data show 3-D effects in a considerable amount of sites and periods. Therefore in order to get a comprehensive view through the subsurface resistivity distribution of the Sehqanat oil field, two- and three-dimensional inversions were performed on the magnetotelluric data. The 2-D and more precisely 3-D resistivity models, resolved the Gachsaran-Asmari formations boundary as a transition zone from high conductivity to more resistivity range. The Sehqanat anticline has also been delineated throughout the 2-D and 3-D resistivity models as a resistive dome-shaped body corresponded to the middle parts of MT acquisition profiles. Correlation of the magnetotelluric resistivity models with the adjacent 2-D reflection seismic sections is remarkable, letting us to accomplish more reliable interpretation of subsurface geology of the survey area.

Keywords: 2-D and 3-D inversion, Asmari formation, Gachsaran formation, magnetotelluric, reflection seismic, Sehqanat oil field, transient electromagnetic, Zagros zone.

*Corresponding author:

boskooi@ut.ac.ir