فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحهٔ ۵۷۵-۵۸۶

وارونسازی دو و سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک بهمنظور اکتشاف ساختارهای هیدروکربنی در میدان نفتی سهقنات، جنوبغربی ایران

عيسي منصوري'، بهروز اسكوئي'*، لاوست پدرسن" و رحمان جواهري*

۱. دانش آموخته 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 اپسالا، سوئد ۴. کارشناس ارشد، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ایران

(دريافت: ۹۴/۶/۲۹، پذيرش نهايي: ۹۵/۷/۲۷)

چکیدہ

کاربرد روش مگنتوتلوریک در زمینهٔ 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 نفت گیر تاقدیسی، و در حوضهٔ 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، سنگ پوش را تشکیل می دهد. در میدان نفتی سهقنات، رُخنمون 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. نگارهای چاهپیمایی استخراجی از چاه اکتشافی سهقنات، به علت تباین مقاومت ویژهٔ الکتریکی سازند گچساران با سازندهای زیرین، استفاده از روش مگنتوتلوریک را بهمثابهٔ مکمل دادههای روش لرزهنگاری توجیه می کند. بهمنظور اعمال تصحیح جابهجایی پایا نیز، اندازه گیریهای الکترومغناطیسی در حوزهٔ زمان صورت گرفته است. بررسی بُعد و امتداد دادههای مگنتوتلوریک حاکی از وجود مقادیر متنابهی از تاثیر ساختارهای سه بُعدی در منطقه مورد تحقیق مدل های مقاومت ویژهٔ الکتریکی سازند گچساران با سازندهای زیرین، استفاده از روش مگنتوتلوریک را بهمثابهٔ مکمل دادههای روش لرزهنگاری توجیه می کند. بهمنظور اعمال تصحیح جابهجایی پایا نیز، اندازه گیریهای الکترومغناطیسی در حوزهٔ زمان صورت گرفته است. بر وارون سازی دو و سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک، مرز سازندهای گچساران و آسماری بهمانند تاقدیس نفتی سهقنات در مدل های مقاومت ویژهٔ الکتریکی آشکار شده است. در مدل های پیش گفته، مقادیر مقاومت ویژهٔ الکتریکی در عبور از سازند گچساران مدل های مقاومت ویژهٔ الکتریکی آشکار شده است. در مدل های پیش گفته، مقاومت ویژهٔ الکتریکی در عبور از سازند گخرمان تفسیر جامعی از تشکیلات زمین شناسی تحتالارضی میدان نفتی سهقنات میسر کرده و نقاط مبهم نتایج روش لرزه ای رازه ای مرتفع شده است.

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

۱. مقدمه

روش مگنتو تلوریک (MT) یکی از روش های الکترومغناطیسی در حوزهٔ بسامد است که در سال های اخیر جایگاه ویژه ای را در بین سایر روش های اکتشافی به خود اختصاص داده است. روش مگنتو تلوریک به لحاظ چشمهٔ فرستنده، جزء روش های غیرفعال است که از میدان های الکترومغناطیسی طبیعی زمین به منظور بررسی ساختار مقاومت ویژهٔ الکتریکی زیر سطحی استفاده می کند (کانیارد، ۱۹۵۳). در این روش امواج الکترومغناطیس با توجه به بسامد آنها و نیز مقاومت ویژهٔ

لایه ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به دست می دهند. عمق بررسی در روش مگنتو تلوریک خیلی بیشتر از دیگر روش های الکترومغناطیسی است. این روش را می توان برای کاوش های زیر سطحی از اعماق ده ها متر تا ده ها کیلومتر به کار برد (ووزوف، ۱۹۹۱؛ اسکویی، ۲۰۰۴؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۰۵؛ اسکویی و منصوری، ۲۰۱۴؛ اسکویی و همکاران، ۲۰۱۵؛ اسکویی و منصوری، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵). وجود تباین در مقاویر مقاومت ویژهٔ الکتریکی

در گذر از لایه و ساختارهای زیرسطحی بهترین هدف اکتشافی برای روش مگنتو تلوریک محسوب می شود. کاربرد روش فوق در زمینهٔ اکتشاف های هیدرو کربوری نیز قابل توجه است و این امر در مناطقی که روش لرزه نگاری باز تابی با مشکلاتی مواجه می شوند، اهمیت بیشتری دارد. در مواردی که سطح زمین از لایه هایی ناهمگن، دارای خاصیت های مومسان و با سرعت موج لرزه ای زیاد پوشیده شده باشد، کیفیت داده های لرزه ای باز تابی به شدت تضعیف می شود و در بسیاری از موارد غیر قابل تفسیر می شوند (اورنج، ۱۹۸۹؛ بمیش و تراواسوس، ۱۹۹۲؛ وارن و سرنکا، ۱۹۹۲؛ هوورستن،

(a) Kilometers Sehqanat Well 5 10 20 Seismic Profile MT Profile Geological Cross Section AA Oil Field nation nari-Limestone-Oligo Mic ri-Conglomerate-Upper Plio umi-Shale-Lower Upper Cre ahbari Member-Shale Sand Stone-Pliocene Mishan-Marl Stone-Miocene Pabdeh Gurpi-Shale-Upper Ci r auven Gurpi-Shale-Upper Cretaceous Paleocene Eocene Sarvak-Limestone Dolomite-Upper Cretaceous

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی (مربع مشگیرنگ) در نقشهٔ زمین شناسی ساختمانی ایران نشان داده شده است. موقعیت میدان نفتی سهقنات در کنار میدان های نفتی مجاور با حلقه های مشگیرنگ بسته در نقشهٔ زمین شناسی (a) دیده می شود؛ خطوط موازی مشگیرنگ موقعیت نیمرُخ های مگنتو تلوریک، خطوط سبزرنگ موقعیت خطوط لرزهنگاری، خطوط سرخرنگ موقعیت تاقدیس های منطقه و دایرهٔ زردرنگ محل چاه اکتشافی سهقنات را نشان میدهد. مقطع عرضی زمین شناسی در امتداد خط 'AA در قسمت (d) آمده است.

۱۹۹۹؛ وارن، ۱۹۹۶؛ تراواسوس و منزس، ۱۹۹۹؛ مارتینی و همکاران، ۲۰۰۵؛ ژیائو 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 بررسی های 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 به مثابهٔ بزرگ ترین و در عین حال کم عمق ترین افق تولید نفت در جنوب غربی ایران شناخته می شود.

دادههای لرزهای طی چند مرحله و در طول نیم رُخهای گوناگونی برداشت شده است اما نتایج حاصل از پردازش آنها، کیفیت موردنظر برای تفسیر دقیق زمین شناسی را ندارد و به همین سبب از روش مگنتو تلوریک درحکم روش مکمل استفاده شده است (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). برای نمونه دو مقطع لرزه نگاری دو بعدی از منطقه مورد بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است و همان طور که دیده می شود در بسیاری از موارد، ردیابی لایه ها و پدیده های زمین شناسی مور دنظر عملاً غیر ممکن به نظر می رسد.

رُخنمون 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 به دست آمده از نگارهای چاه پیمایی در چاه اکتشافی سه قنات (شکل ۳) و همچنین چاه های اطراف نشان دهندهٔ تباین زیاد مقاومت ویژهٔ چاه های اطراف نشان دهندهٔ تباین زیاد مقاومت ویژهٔ هدف اید ثالی برای روش مگنتو تلوریک محسوب می شود (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). ناهمگن بودن سازند گچساران از جمله عواملی است که می تواند

باعث ایجاد واپیچش و جابهجایی پایا در دادههای مگنتوتلوریک شود. بنابراین بهمنظور تصحیح خطاهای احتمالی حاصل از رویداد پیش گفته، دادههای الکترومغناطیسی در حوزهٔ 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 حد بسیار زیادی عاری از واپیچش ناشی از محیطهای ناهمگن است و ازاینرو می توان آن را مرجع مناسبی برای تصحیح دادههای مگنتوتلوریک به شمار آورد. تصحیح پیش گفته را می توان با جابهجایی و انطباق خمهای مقاومت ویژهٔ ظاهری مگنتوتلوریک با خمهای دادههای *TDEM* عملی ساخت (ژیراسک، ۱۹۹۰).



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



شکل ۲. 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 ویژهٔ الکتریکی در دو عمق حدود ۵۰۰ و ۱۲۰۰ متر دیده میشود که در انطباق با مرز سازندهای گچساران–آسماری و پابده گورپی– سروک است.

با پیشرفتهای قابل ملاحظهای که اخیراً در ساخت تجهیزات، روشهای پردازشی و سرعت محاسبات رایانهای رخ داده است، مدل سازی سه بعدی دادههای مگنتو تلوریک نیز امکان پذیر شده است. روشهای 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 ویژهٔ الکتریکی عرضه کنند. مدل های دو و سه بعدی مقاومت ویژهٔ الکتریکی جاصل از وارون سازی داده های مگنتو تلوریک میدان نفتی سه-قنات عرضه می شود.

۲. زمین شناسی میدان نفتی سهقنات

کشور ایران بهلحاظ زمین شناسی ساختمانی به هفت ناحیهٔ البرز، ایران مرکزی، کپه داغ، مکران، سیستان، سنندج سیرجان و زاگرس تقسیم می شود (شکل ۱). بیش از ۹۵ درصد میدان های نفتی ایران در ناحیهٔ زاگرس واقع شده است. این منطقه در اثر رسوبگذاری مداوم و فقط با وقفههایی اندک، از زمان تریاس تا میوسن شکل گرفته است. نبود پدیده های آتشفشانی و دگرگونی، پراکندگی اندک رُخنمون سنگهای پالئوزوئیک و تعدد تاقدیس های بزرگ در کنار ناودیس های کوچک از دیگر ویژگی های زمین شناسی ناحیهٔ زاگرس محسوب می شود.

منطقهٔ زاگرس در قسمتهای شمال غربی، غربی و جنوب غربی ایران و کرانهٔ شرقی خلیج فارس قرار دارد. امتداد زمین شناسی آن شمال غربی – جنوب شرقی است و گسترهای بالغ بر ۱۵۰۰ کیلومتر را دربر می گیرد. ناحیهٔ زاگرس در مرز صفحات قارهای 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 چینهای موازی و هم امتداد شمال غربی – جنوب شرقی در اثر

برخورد پیش گفته تشکیل شده است که اکنون به شکل تاقدیس های مرتفع و کوههایی با قلههای بلند که ارتفاع آنها گاه به ۳۶۰۰ متر بالای سطح دریا نیز میرسد، دیده میشوند. در ۱۹۰۸ اولینبار در یکی از همین تاقدیسها (در شهر مسجدسلیمان)، عملیات اکتشاف نفت به موفقیت رسید و از آن پس تلاشهای زیادی برای پی جوییهای بیشتر صورت گرفته است.

در حال حاضر، حوضهٔ رسوبی زاگرس یکی از بزرگ ترین ذخائر هیدرو کربنی جهان شناخته می شود و هر ساله تعداد زیادی عملیات اکتشافی ژئوفیزیکی بهمنظور پیجویی مخازن جدید در آن در حال اجرا است. بیشترین ذخائر نفتی و گازی حوضهٔ زاگرس در ارتباط با مخازن آهکی و کربناته است (مطیعی، ۱۹۹۵). مهم ترين اين مخازن، سازند آسماري با سن اليگو-ميوسن است که بعد از آن سازند سروک (گروه بنگستان) با سن آلبین-کامپانین اهمیت ویژهای 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 میرود که ضخامتی متغیر از چند متر تا بیش از ۵۰۰ متر را در بر می گیرد. این سازند عمدتاً از آهکهای 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 بهمنزلهٔ سنگ منشا مخزن آسماری و هم سنگپوش دیگر مخزن کربناته یعنی سازند سروک، قلمداد میشود. در بخش زیرین سازند سروک

نیز سازند عمدتاً شیلی کژدمی نهشته شده است که درواقع عمده ترین سنگ منشا در حوضهٔ رسوبی زاگرس به شمار می رود (مطیعی، ۱۹۹۵). نقشهٔ زمین شناسی محدودهٔ مورد بررسی، دربردارندهٔ رُخنمون سطحی سازندهای موجود به همراه جنس و سن زمین شناسی آنها، امتداد بر آوردی تاقدیس های منطقه، موقعیت نیم رُخهای مگنتو تلوریک و همچنین مقطع عرضی زمین شناسی در راستای خط AA در شکل ۱ آمده است. همان طور که در مقطع عرضی طرف شمال شرقی، همزمان با پیچیده تر شدن ساختارها، چندین تاقدیس کوچک و بزرگ به چشم می خورد که البته هندسه و موقعیت آنها دقیق نیست و بر اساس اطلاعات کلی تحتالارضی به نقشه در آمده اند.

۳. برداشت و پردازش دادههای مگنتو تلوریک برداشت دادههای مگنتو تلوریک در منطقهٔ مورد بررسی، با اندازهگیری میدانهای الکتریکی در دو جهت افقی $(H_y \ e_y)$ و مغناطیسی در دو جهت افقی $(H_y \ e_y)$ و (H_x) یک جهت عمودی (H_z) صورت گرفته است. جهت x مطابق با جهت شمال مغناطیسی و میزان زاویهٔ انحراف آن از شمال جغرافیایی حدود °3 است. مولفه های افقی میدان الکتریکی، روی سطح زمین، به شکل متعامد و با استفاده از دو جفت الكترودهاي غير قابل قُطبش (حاوى PbCl₂) اندازه گیری شده است. E_x و E_y با اندازه گیری اختلاف يتانسيل، Δ٧، بين جفت الكترودها محاسبه مي شود، بدين صورت که $E = \frac{\Delta V}{d}$ در حالی که d فاصلهٔ بین الکترودها است. مولفههای افقی و عمودی میدان مغناطیسی نیز روی سطح زمین و از پیچههای مغناطیس سنج القایی اندازه گیری می شود. به منظور 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 مغناطیس سنج به شکل عمودی در زمین و دفن هرچه بیشتر آن در جهت ارتقای کیفیت دادهها، صورت

می گیرد. داده های مگنتو تلوریک با تفکیک مکانی بسیار زياد در حوضهٔ ميدان نفتي سهقنات واقع در جنوب غربي ايران برداشت شده است. اين دادهها طي مدتزمان يك سال و تحت نظارت مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ايران جمع آوري شده است. اطلاعات پيش گفته در محل بیش از ۶۰۰ ایستگاه و در طول پنج نیم رُخ موازی با اسامی ۸۸۱۳ ۸۸۱۴، ۸۸۱۵ ۸۸۱۶ و ۸۸۱۷ با جهت یافتگی شمال شرقی-جنوب غربی (عمود بر روند کلی زمین شناسی منطقه)، ثبت شده است. فاصلهٔ بین نیم رُخها سه کیلومتر و فاصلهٔ 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 نیمرُخهای پیش گفته برداشت شدهاند. نیمرُخهای مگنتوتلوریک بەنحوى طراحى شدەاند كە بە شكل عمود بر روند ظاهری ساختارهای منطقهای قرار بگیرند. همچنین، این طراحی با در نظر گرفتن نتایج خطوط لرزهنگاری دوبُعدی برداشت شده در منطقهٔ 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 نیمر ُخ ۸۸۱۵ واقع شده است. تابعهای تبدیل مگنتو تلوریک از راه پردازش سریهای زمانی مولفههای الکتریکی (E) و مغناطیسی (H) برداشت شده در عملیات صحرایی، بهدست می آید. تغييرات زماني ميدان هاي الكتريكي و مغناطيسي دادههاي MT به شکل تابعی از زمان اندازهگیری میشود. سریهای زمانی در حافظهٔ دستگاه برداشت دادهها ثبت میشود و سپس در نرمافزارهای مربوط مورد ارزیابی كنترل كيفي قرار مي گيرد. از جمله موارد كنترلي دادهها، شکل ظاهری سریهای زمانی خام، طیف بسامدی و همچنین همدوسی بین جفت مولفههای الکتریکی و مغناطیسی متعامد است. در مرحلهٔ پردازش سریهای زمانی، یک فاصلهٔ زمانی بهمنظور اعمال تبدیل فوریه

سریع انتخاب می شود، سپس ضریب های فوریه محاسبه می شود و درنهایت با تبدیل فوریهٔ گسسته (Discrete می شود و درنهایت با تبدیل فوریهٔ گسسته (fourier transform (DFT) (dution transform) به دست می آید. در گام بعد و با محاسبهٔ مقادیر تانسور پاگیری (امپدانس) Z_i (معادلهٔ ۱)، می توان مقادیر مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز در حوزهٔ بسامد را از راه معادله های (۲) محاسبه کرد.

$$\begin{split} Z_{xx} &= \frac{\langle E_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle E_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle}{\langle H_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle H_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle} \tag{1} \\ Z_{xy} &= \frac{\langle E_x H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle E_x H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}{\langle H_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle H_y H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle} \\ Z_{yx} &= \frac{\langle E_y H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle E_y H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle}{\langle H_x H_x^* \rangle \langle H_y H_y^* \rangle - \langle H_x H_y^* \rangle \langle H_y H_x^* \rangle} \\ Z_{yy} &= \frac{\langle E_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle E_y H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle}{\langle H_y H_x^* \rangle \langle H_x H_y^* \rangle - \langle E_y H_y^* \rangle \langle H_x H_x^* \rangle} \end{split}$$

$$\rho_{a}(\omega) = \frac{1}{\mu_{0}\omega} \left| \hat{Z}_{1} \right|^{2} = \frac{1}{\mu_{0}\omega} \left| \frac{E_{x}}{H_{y}} \right|^{2} = \tag{(Y)}$$
$$\frac{1}{\mu_{0}\omega} \left| \frac{E_{y}}{H_{x}} \right|^{2} \quad and \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Im \hat{Z}_{1}}{Re \hat{Z}_{1}} \right)$$

یک نمونه از دادههای مگنتو تلوریک پردازش شده میدان نفتی سهقنات، در قالب بزرگی و فاز مولفههای پاگیری در شکل ۴ آمده است. نمودارهای مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز محاسبه شده از مولفههای پاگیری پیش گفته نیز در همین شکل، نشان داده شده است.

مگنتو تلوریک، تحلیل بُعد و تعیین امتداد غالب ژئوالکتریکی این داده ها است.یک بُعدی، دوبُعدی و یا سه بُعدی بودن و همچنین تعیین جهت امتداد ساختارهای زمین شناسی زیر سطحی در این مرحله بر آورد می شود. در راستای تحلیل بُعد داده های مگنتو تلوریک روش های متنوعی عرضه شده است که از جمله می توان به رهیافت چاولهٔ (اسکیو) سویفت (Skew Swift) (سویفت، ۱۹۶۷) اشاره کرد. کمیت چاولهٔ سویفت از معادلهٔ (۳) محاسبه می شود؛

(۳)

$$S_1 = \frac{|S_1|}{|D_2|}$$
 (۳)
 $S_1 = Z_{xx} + Z_{yy}$ and $D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}$
irizers Z_{xx} , and $D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}$
irizer Z_{xx} , and $D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}$
irizer Z_{xx} , and $D_2 = Z_{xy}$, and Z_{xy}
irizer Z_{xx} , and Z_{xy} , and Z_{xy}
irizer Z_{xx} , and Z_{xy} , and Z_{xy}
irizer Z_{xy} , and Z_{xy} , and Z_{xy} , and Z_{xy}
irizer Z_{xy} , and Z_{x



های

شکل ۴. نمونهای از دادههای مگنتوتلوریک پردازش شده در میدان نفتی سهقنات؛ در نمودارهای سمت چپ، چهار مولفه تانسور پاگیری بههمراه 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 xx (منطبق با جهت شرق غرب) دیده می شود.



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



۹۰ امتداد ژئوالکتریکی برآورد شده بهروش ژانگ برای هر پنج نیمرُخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سهقنات زاویهٔ تقریبی N60W را با توجه به ابهام ۹۰ درجهای نشان میدهد.

به منظور تعیین امتداد ژئوالکتریکی، از روش عرضه شدهٔ ژانگ و همکاران (۱۹۸۷) استفاده شده است. زاویهٔ امتداد بر آورد شده در این رهیافت، دارای ۹۰ درجه ابهام است و برای تأیید صحت آن باید از اطلاعات تکمیلی دیگر، مانند مشاهدات زمین شناسی منطقهای، کمک گرفت. مقادیر زاویهٔ امتداد ژئوالکتریکی به روش ژانگ برای هر پنج نیمرُخ مگنتو تلوریک در میدان نفتی سهقنات برآورد کرد (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). محاسبهٔ پارامتر فوق با میانگین گیری از دادههای سه ایستگاه مجاور و سه دورهٔ تناوب پی در پی و اعمال میزان کف خطای سه درصد صورت گرفته است.

برآورد زاویهٔ امتداد ژئوالکتریکی بهروش فوق با در نظر گرفتن ابهام ۹۰ درجهای و امتداد ظاهری شمالغربی– جنوبشرقی ساختارهای زمین شناسی در

منطقهٔ مورد بررسی، زاویهٔ تقریبی N60W را نشان میدهد (شکل ۶).

۸. وارونسازی دوبُعدی و سهبُعدی دادههای مگنتو تلوریک با توجه به تجزیه و تحلیل های مقدماتی صورت گرفته درخصوص دادههای مگنتو تلوریک میدان نفتی سهقنات که شامل مواردی همچون تحلیل بُعد و بررسی جهت امتداد ژئوالکتریکی دادهها میشود، مدلسازی دو و سهبُعدی در دستور کار قرار گرفت. در همین راستا و پس از اجرای کلیهٔ مراحل پردازشی اولیه، دادههای مگنتو تلوریک در قالب مقادیر مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز در محدودهٔ دورهٔ تناوب ۲۰/۰۰ تا ۱۰۰۰ ثانیه برای وارونسازی، مهیا شد. تعداد کل ایستگاههای مورد استفاده در وارونسازی دوبُعدی بالغ بر ۵۴۰ عدد و در

وارونسازی سه بعدی به علت افزایش بسیار زیاد حجم محاسبات ۱۰۰ عدد است که در طول پنج نیم رُخ موازی با امتداد جنوب غربی – شمال شرقی واقع شدهاند. موقعیت ایستگاههای انتخاب شده برای وارونسازی دو بعدی و سه بعدی در شکل ۷و به تر تیب با رنگهای آبی و سرخ نشان داده شده است. همان طور که در شکل نیز دیده می شود، ایستگاههای مورد استفاده برای وارونسازی سه بعدی، به نحوی انتخاب شدهاند که علاوه بر پوشش یکنواخت، بر قسمت میانی نیم رُخها که منطبق بر محل تاقدیس سه قنات است، متمر کز باشند.

به منظور درک واقعی تر از هندسه و خصوصیات ژئوالکتریکی تشکیلات زمین شناسی تحت الارضی، وارون سازی دو بُعدی داده های مگنتو تلوریک برای پاگیری، د ترمینان (پدرسن و انگلس، ۲۰۰۵) صورت گرفته است. پاگیری د ترمینان، میانگینی از مقادیر مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز را در دو جهت اندازه گیری *yx* (منطبق با جهت شمال-خوب) و *xy* (منطبق با جهت شرق- غرب) به دست می دهد و اثرات ناشی از وجود ساختارهای سه بعدی محلی و واپیچش ناهمگنی های سطحی را تا حد زیادی تضعیف و اگرت، ۲۰۰۰؛ ارتقا یافته از سوی پدرسن و انگلس، ۲۰۰۵ و کالشوئر و همکاران ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) و *TMV3DMT* (سیریون واراپورن و اگبرت ، ۲۰۰۰) که در این تحقیق و به ترتیب برای وارون سازی دو بعدی و سه بعدی داده های

مگنتوتلوریک مورد استفاده قرار گرفتهاند، از روش تفاضل های محدود و شبکهٔ مستطیلی برای گسستهسازی فضای مدل استفاده میکنند و روش وارونسازی اکام (کانستبل و همکاران، ۱۹۸۷) را بهمنظور پیدا کردن یک مدل هموار به کار می گیرند. مزیت اصلی روش های فوق، اجرای فرایند وارونسازی در فضای داده است که حجم محاسباتی مسئله را بهنحو چشمگیری کاهش میدهد. بهمنظور یایدار و همگرا کردن محاسبات وارونسازی، از دادههای لرزهای در حکم مدل اولیهٔ حاوی اطلاعات کلی از هندسهٔ ساختارهای تحتالارضی بهخوبی بهره گرفته شد. همگرایی وارونسازی دوبُعدی و سهبُعدی با حداقل خطای میانگین مربعات (rms) در چند تکرار اول حاصل شد که این امر نشاندهندهٔ پایدار بودن فرایند وارونسازی دادهها است. مقادیر *rms* برای وارونسازی دوبُعدی و سهبُعدی به ترتیب ۱/۲ و ۲/۲ و بیان کنندهٔ برازش قابل قبول داده های محاسبه شده و مشاهده شده است (منصوری و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶). مقادیر مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز مشاهده شده، دادهای محاسبه شده و باقیمانده، تفاوت آنها برای مُد دترمینان و در طول نیمرُخ ۸۸۱۵ در شکل ۸ آمده است. شکل ۹ مدلهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی حاصل از وارونسازی دوبُعدی را برای پنج نیمرُخ مگنتو تلوریک در میدان نفتی سهقنات نشان میدهد. مرز سازندهای گچساران و آسماري و همچنين هندسهٔ تاقديس سەقنات در اين مدلها آشکار شده است.



شکل ۷. شبکهٔ طراحی شده برای وارونسازی سهبُعدی دادههای مگنتوتلوریک میدان نفتی سهقنات؛ تراکم سلولها در قسمت میانی منطقهٔ مورد بررسی، بیشتر شده است.



شکل ۸ مقادیر مقاومت ویژهٔ ظاهری و فاز مشاهده شده (قسمت بالایی)، دادههای محاسبه شده (قسمت میانی) و باقیماندهٔ تفاوت آنها (قسمت پایینی) برای مُد دترمینان در طول نیمرُخ ۸۱۱۵



شکل ۹. مقاطع دوبُعدی مقاومت ویژهٔ الکتریکی حاصل از مدلسازی دادههای مُد دترمینان برای پنج نیمرُخ مگنتوتلوریک در میدان نفتی سهقنات

همبستگی و تطابق زیاد مدلهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی دوبُعدی با مقاطع برانبارش لرزهای در شکل ۱۰ بهخوبی قابل رویت است. این امر نشان میدهد که با تلفیق نتایج روش مگنتوتلوریک و لرزهنگاری می توان 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 سهُبعدی دادههای مگنتوتلوریک، اثرات ناشی از ناهمگنیهای سطحی و

ساختارهای سه بعدی محلی که منجر به ایجاد پدیده واپیچش نیز می گردند به شکل خودکار تضعیف شده و مدل مقاومت ویژهٔ نهایی، نقشه واقعی تری از تشکیلات زیرسطحی را به دست می دهد. مدل نهایی مقاومت ویژهٔ الکتریکی حاصل از وارون سازی سه بعدی داده ها در قالب یک مکعب سه بعدی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، ساختارهای ژئوالکتریکی تحت الارضی انسجام بیشتر، و هندسهٔ تاقدیس سه قنات نیز پیوستگی بهتری دارد.









۶. نتيجه گيري

دادههای مگنتو تلوریک با تفکیک مکانی زیاد در میدان نفتی سهقنات و بهمنظور تصویرسازی از ساختارهای زمین شناسی تحتالارضی برداشت شد. اهداف اصلی تحقیق حاضر شامل به نقشه در آوردن مرز زمین شناسی سازندهای گچساران و آسماری و همچنین هندسهٔ

تاقدیس سهقنات به کمک مدلهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی است. تجزیهوتحلیل صورت گرفته درخصوص بُعد و امتداد ژئوالکتریکی دادهها نشان داد که ساختارهای زمینشناسی منطقهای به شکل کلی دوبُعدی است، اگر چه اثر برخی ساختارهای محلی سهبُعدی نیز دیده می شود. در همین راستا وارون سازی دو استفاده از نحوهٔ توزیع مقاومت ویژهٔ الکتریکی به شکل مطلوبی برطرف شود.

تشکر و قدردانی

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

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, Magnetotellurtc 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 twodimensional 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 سه بعدی داده ها صورت گرفت و مرز سازندهای گچساران و آسماری در مدل های مقاومت ویژهٔ الکتریکی آشکار شد. مقادیر مقاومت ویژهٔ الکتریکی در عبور از سازند گچساران به سازند آسماری با افزایش قابل ملاحظه ای تفکیک شده است و در همین راستا تاقدیس نفتی سهقنات نیز به شکل یک ساختار با مقاومت ویژهٔ زیاد دیده می شود. تطابق و همبستگی بین مقاطع مقاومت ویژهٔ الکتریکی با مقاطع برانبارش لرزه ای روشن ساخت که با تفسیر همزمان نتایج روش های گوناگون ژبوفیزیکی، می توان به تفسیری دقیق و جامع از زمین شناسی زیر سطحی دست یافت. این امر منجر شد تا نقاط ضعف ناشی از کیفیت کم داده های لرزه ای، 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 subbasalt 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, Iodinebearing 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.

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

Ph.D.. Graduated, Institute of Geophysics, Department of Earth Physics, University of Tehran, Iran
 Associate Professor, Institute of Geophysics, Department of Earth Physics, University of Tehran, Iran
 Professor, Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden
 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 Sehganat 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 is 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 Schqanat 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 Schoanat 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 Schqanat 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.