

تفسیر دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک دشت میقان اراک

بهروز اسکونی^۱، حسین پرنیان^{۲*}، محمود میرزایی^۳ و بهنام محمدی^۲

۱. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک، بخش ژئوفیزیک، دانشکده علوم دانشگاه اراک، ایران

(دریافت: ۹۳/۷/۲۹، پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۲۸)

چکیده

روش مگنتوتلوریک (MT) به سبب تفکیک‌پذیری جانبی و عمق نفوذ زیاد از مؤثرترین روش‌های الکترومغناطیسی برای تصویرسازی الکتریکی از ساختارهای زیرسطحی است. به دلیل تغییرات مقاومت ویژه در لایه‌های مختلف زمین و ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل و سنگ کف، می‌توان با استفاده از روش مگنتوتلوریک به مطالعه این ساختارها پرداخت. در بهار ۱۳۹۰ اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در بازه فرکانسی وسیعی در جنوب استان مرکزی، به منظور مشخص کردن هدایت الکتریکی پوسته با تأکید بر مشخص کردن ساختارهای زمین‌شناسی و شناسایی سنگ بستر و گسل احتمالی انجام گرفت. مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طول یک پروفیل و در شش ایستگاه با فاصله‌های ۱۰۰۰ متر اندازه‌گیری شدند. پردازش داده‌ها و به دنبال آن وارون‌سازی یک‌بعدی برای هر کدام از سایت‌ها صورت گرفت و در ادامه وارون‌سازی دوبعدی این داده‌ها اجرا شد. نتایج به‌دست‌آمده از وارون‌سازی و مدل به‌دست‌آمده از مد TE، هدایت الکتریکی ساختارها را در توافق خوبی با داده‌های زمین‌شناسی مشخص کرده است. از مهم‌ترین این نتایج می‌توان به شناسایی یک گسل احتمالی پنهان و همچنین سنگ کف در عمق با مقاومت ویژه زیاد اشاره کرد. مدل دوبعدی ضمن تفکیک لایه‌های رسوبی براساس تباین مقاومت ویژه آن‌ها، به‌خوبی نشان‌دهنده ساختار گسلی است.

واژه‌های کلیدی: اراک، گسل تبرته، مقاومت ویژه، مگنتوتلوریک، وارون‌سازی

۱. مقدمه

جهانی و نوسانات مغناطیس سپهری سرچشمه می‌گیرند (وزوف، ۱۹۹۱). این سیگنال‌های الکترومغناطیسی در جو مانند امواج رادیویی منتقل می‌شوند اما در زمین پخش و به‌سرعت با عمق میرا می‌شوند. در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ مگنتوتلوریک در حکم یک وسیله شناسایی استفاده شد که می‌توانست تغییرات را در ضخامت حوزه‌های رسوبی به تصویر بکشد. آنالیز داده‌ها در آن زمان به مدل‌سازی پیشرو و معکوس یک‌بعدی محدود بود که برای مناطقی با ساختار زمین‌شناسی پیچیده قابل اعتماد نبود. در سال‌های اخیر توانایی این روش در آشکارسازی زمین‌شناسی کاملاً بهبود یافته است. این امر با پیشرفت در وسایل اندازه‌گیری و وارون‌سازی و تفسیر دوبعدی آن محقق شده است. همچنین پیشرفت‌های زیادی در زمینه پردازش داده‌های مگنتوتلوریک صورت گرفته که این مراحل برای تبدیل داده‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد ضروری است. با

روش مگنتوتلوریک از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است. این روش تکنیک ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین در بررسی ساختار مقاومت ویژه زیرسطحی استفاده می‌کند. در فصل مشترک‌های افقی و عمودی جداکننده دو محیط با خواص الکتریکی متفاوت، روش‌های الکترومغناطیسی را برای شناسایی عوارض زمین‌شناسی و به‌ویژه زون‌های گسلی به کار می‌برند. در این روش امواج الکترومغناطیسی با توجه به بسامدشان و نیز مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به‌دست می‌دهند. عمق بررسی در روش مگنتوتلوریک خیلی بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. در روش مگنتوتلوریک از امواج الکترومغناطیسی با بسامد کم برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی استفاده می‌شود. این امواج بسامدهایی در پهنای 10^{-4} تا 10^{-3} هرتز دارند و از فعالیت‌های ناشی از وقوع آذرخش در مقیاس

ساختارهای زیرسطحی در توافق خوب با زمین‌شناسی و زمین‌ساخت نمایش داده می‌شود. از اندازه‌گیری‌های مؤلفه‌های افقی میدان الکترومغناطیسی، تانسور امپدانس مختلط به صورت تابعی از بسامد به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود (کانتول و مادن، ۱۹۶۰):

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

که در آن، Z تغییرات افقی و عمودی رسانایی الکتریکی زیرسطحی را در یک ایستگاه اندازه‌گیری مشخص، نشان می‌دهد. تانسور امپدانس اطلاعات مفیدی درباره بُعد و امتداد ساختارهای رسانا فراهم می‌کند. مقاومت ویژه ρ_a و فاز ϕ ، کمیت‌های مطلوبی هستند که از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند:

$$\rho_{ai} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_i|^2, \quad (2)$$

$$\phi = \text{phase}(Z_i) \quad i = xx, xy, yx, yy, DET \quad (3)$$

که در آن، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلأ، ω بسامد زاویه‌ای و DET نشان‌دهنده داده‌های دترمینان است.

سری‌های زمانی اندازه‌گیری‌شده در نوارهای بسامدی گوناگون به حوزه بسامد تبدیل و برای برآورد تانسور امپدانس به منزله تابعی از بسامد، طیف توان عرضی محاسبه می‌شود. دترمینان تانسور امپدانس، امپدانس مؤثر (Z_{DET}) نامیده شده و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (پدرسن و انگل، ۲۰۰۵):

$$Z_{DET} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (4)$$

با استفاده از امپدانس مؤثر، مقاومت ویژه ظاهری و فاز محاسبه می‌شود. مزیت استفاده از داده‌های دترمینان این است که میانگین مفیدی از امپدانس را برای همه جهت‌های جریان فراهم می‌کند. همچنین نیازی به تصحیح جابه‌جایی ایستا (static shift correction) نیست و بُعد (dimension) داده‌ها لحاظ نمی‌شود، چون امپدانس مؤثر میانگینی را از همه جهت‌های جریان به دست می‌دهد و باعث تولید مدل‌های یک‌بُعدی و دوبُعدی پایدار می‌شود. در یک زمین دوبُعدی رسانندگی الکتریکی در امتداد یک جهت افقی (جهت امتداد زمین‌شناسی) ثابت است و معادلات ماکسول باعث

توجه به توسعه الگوریتم‌هایی که از روش‌های آماری پایدار (Robust statistics) برای به دست آوردن مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌کنند، پردازش این سری‌های زمانی توسعه و بهبود یافته است. این روش‌ها به طور خودکار قادر به از بین بردن قسمت‌های دارای داده‌های نوفه‌دار و نامناسب هستند که این امر چالش‌های پیش‌روی پردازش داده‌های مگنتوتلوریک را بسیار کاهش داده است.

در این مقاله کاربرد روش مگنتوتلوریک در تصویرسازی از ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی و به ویژه توانایی آن در آشکارسازی ساختارهای عمیق و زون گسلی بررسی شده است. در بعضی موارد مواد رسانی موجود در پوسته با فعالیت‌های لرزه‌ای در ارتباط اند. شاره‌ها عامل مهمی در زون‌های گسلی هستند و بسیاری از گسل‌های فعال با حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی مشخص می‌شوند. این شاره‌ها همچنین نقش مهمی در فرآیند گسیختگی و آزاد شدن تنش‌ها ایفا می‌کنند و به آزاد شدن انرژی لرزه‌ای و وقوع زلزله‌های حتی بزرگ مقیاس منجر می‌شوند. منطقه مورد بررسی قسمتی از حوضه آبریز اراک است که در مرز دو زون ایران مرکزی و سنندج-سیرجان جای گرفته است. همچنین امتداد گسل تبرته از منطقه مورد بررسی عبور می‌کند که در نقشه‌های زمین‌شناسی به عنوان گسل احتمالی از آن یاد شده است.

۲. نظریه روش مگنتوتلوریک

روش MT از روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی با چشمه طبیعی است که از اوایل سال ۱۹۵۰ در اکتشافات نفت، منابع معدنی و منابع زمین گرمایی به کار گرفته شد. اساس این روش اندازه‌گیری تغییرات میدان‌های الکترومغناطیسی در سطح زمین است که همانند بسیاری از روش‌های ژئوفیزیکی الکتریکی و الکترومغناطیسی توزیع مقاومت ویژه زمین را نسبت به عمق مشخص می‌کند.

در روش مگنتوتلوریک میدان‌های الکتریکی متغیر اندازه‌گیری می‌شود و از راه آن‌ها خواص الکتریکی

جدایی مُدهای TE و TM می‌شود. یک دستگاه مختصات فرضی در نظر گرفته می‌شود که در آن محور x موازی با امتداد ساختار (محور y در امتداد نیم‌رخ) و نیم‌رخ عمود بر امتداد و محور z رو به پایین است. در این حالت مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی در مُد TE به ترتیب به صورت H_z, H_y, E_x هستند و در این مُد جریان‌های الکتریکی با امتداد ساختار زیرسطحی موازی هستند. مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی که با مُد TM توصیف می‌شوند، به صورت H_z, H_x, E_y هستند که در این مُد، جریان الکتریکی بر امتداد ساختار عمود است. در یک محیط دوبعدی عنصرهای قطری تانسور امپدانس برابر صفر هستند.

۳. زمین‌شناسی منطقه

حوضه مورد مطالعه حوضه آب‌خیز کویر میقان اراک است. این حوضه، حوضه بسته‌ای است که از نظر زمین‌شناسی ایران در دو بلوک سندانج-سیرجان و بلوک ایران مرکزی واقع شده است. با قرارگیری دو گسل تلخاب در شمال و گسل تبرته در جنوب آن، حوضه مورد نظر به قطعات و بلوک‌های کوچکی تقسیم شده است، به‌طوری که گسل تلخاب جداکننده بلوک آشتیان- نراق و بلوک هفتاد قله در شمال و گسل تبرته جداکننده بلوک هفتاد قله و سندانج-سیرجان در جنوب است. به عبارتی می‌توان گفت حوضه آب‌خیز میقان اراک به سه قطعه (قطعه یا بلوک سندانج-سیرجان، قطعه هفتاد قله و قطعه آشتیان- نراق) تقسیم شده است. این قطعه‌ها از نظر زمین‌شناسی از گذشته تا حال دچار تغییرات عمده‌ای از نظر چین‌خوردگی، دگرگونی، چینه‌شناسی، لرزه‌خیزی فعالیت‌های آذرین و آتشفشانی شده‌اند که هریک ممتازکننده بلوک‌های فوق در منطقه هستند (میرزایی و قدیمی، ۱۳۸۵).

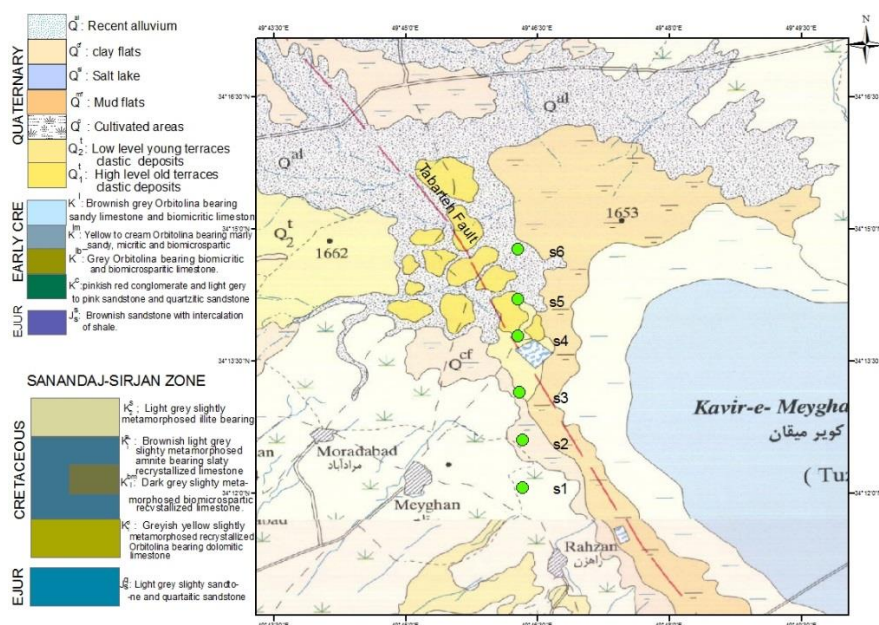
مشهورترین پدیده موجود در استان مرکزی دریاچه فصلی توزلوگل است که به دوره کواترنر مربوط است. ۹۴ درصد سطح دریاچه را قشر نمک و ۶ درصد را نواحی باتلاقی منقطع و کوچک می‌پوشاند. حداقل آثار یک تراس آبرفتی را که به خوبی حفظ شده است، در حاشیه

شمال خاوری می‌توان مشاهده کرد. تراس دریاچه اراک را می‌توان به عنوان یک تراس (پادگانه) فرسایش قطع شده توسط نهشته‌های دریاچه‌ای تعبیر کرد. قدیمی‌ترین سازند این زون را در حوضه آبریز اراک، واحد شیل و ماسه سنگ ژوراسیک (J_s^s) و آنگاه واحدهای کرتاسه تشکیل می‌دهد. کرتاسه از واحدهای کوچک‌تر تشکیل شده که از قدیم به جدید عبارتند از: دولومیت‌های آهکی متبلور (K_1^d)، سنگ‌های آهکی متبلور و اسلیت‌ها (K_1^{sl}). از بین واحدهای ژوراسیک و کرتاسه واحدهای کرتاسه بیشترین گسترش را دارند. شایان توضیح است که واحدهای فوق دارای دگرگونی ضعیف است. واحد کواترنری شامل پادگانه آبرفتی قدیمی (Q_1^f) و پادگانه آبرفتی جوان (Q_2^f) است. بخشی از نقشه زمین‌شناسی منطقه که ناحیه مورد مطالعه در محدوده آن قرار دارد در شکل ۱ قابل مشاهده است. همان‌طور که در نقشه دیده می‌شود، تشکیلات سنگی ناحیه از جنس سنگ‌های آهکی متبلور و اسلیت‌ها (K_1^{sl}) هستند؛ همان جنس سنگ کوه‌های میل و مودر که با رسوبات پادگانه‌ها و نهشته‌های آواری کم‌ارتفاع جوان (Q_2^f) پوشیده شده و سنگ‌های آهکی اسلیتی توسط این نهشته‌ها پوشیده شده است.

۴. برداشت و پردازش داده‌های مگنتوتلوریک

در کاوش حاضر ۶ ایستگاه مگنتوتلوریک در امتداد نیم‌رخ شمالی-جنوبی برداشت شده است. فاصله ایستگاه‌ها از یکدیگر ۱ کیلومتر است. همه داده‌ها به شکل سری‌های زمانی خام برای ۵ مؤلفه میدان الکترومغناطیسی (۲ مؤلفه الکتریکی: E_x, E_y و ۳ مؤلفه مغناطیسی: H_x, H_y, H_z) اندازه‌گیری شده است. محل ایستگاه‌های برداشت و زمین‌شناسی منطقه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در این تحقیق داده‌ها با استفاده از رهیافت اسمیرینوف (۲۰۰۳) پردازش شده است که با روش‌های پردازشی پایدار (Robust method) تابع تبدیل ژئومغناطیسی را به دست می‌دهد. بعضی فرکانس‌ها که حاوی نویز بودند، در برخی ایستگاه‌ها حذف شدند.



شکل ۱. محل ایستگاه‌های برداشت و زمین‌شناسی منطقه (تغییر داده‌شده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی).

۵. تحلیل بُعد داده‌ها

سویت (۱۹۶۷) پارامتر اسکيو (skew) را که از عضوهای ماتریس امیدانس برای تحلیل بُعد داده‌ها قابل محاسبه است، به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$S = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right| \quad (5)$$

هنگامی که مقدار پارامتر اسکيو برحسب بسامد کمتر از ۰/۲ باشد، ساختارهای زمین‌شناسی را می‌توان به صورت ساختارهای یک‌بعدی یا دوبعدی غیرآشفته (undistorted 1D and 2D Structures) تعریف کرد. در غیر این صورت ساختارهای موجود به صورت ساختارهای یک‌بعدی یا دوبعدی آشفته (Distorted 1D and 2D structures) یا به صورت ساختارهای سه‌بعدی تعریف می‌شوند. تحلیل بُعد داده‌های مگنتوتلوریک نشان می‌دهد که داده‌ها ناشی از چه نوع ساختاری هستند و نوع برنامه برگردان (Inversion) براساس آن انتخاب می‌شود. تحلیل بُعد داده‌ها در مورد داده‌های مگنتوتلوریک منطقه میقان نشان می‌دهد که با توجه به اینکه مقدار اسکيو در بیشتر ایستگاه‌ها کمتر از ۰/۲ است، پس برای داده‌های حاصل از منطقه در حالت کلی فرم یک‌بعدی و یا دوبعدی غیرآشفته صادق است. برای سایت ۱ پارامتر اسکيو مقادیر نسبتاً زیادی را نشان می‌دهند که می‌تواند در اثر وجود آشفته‌گی‌های گالوانیکی (galvanic)

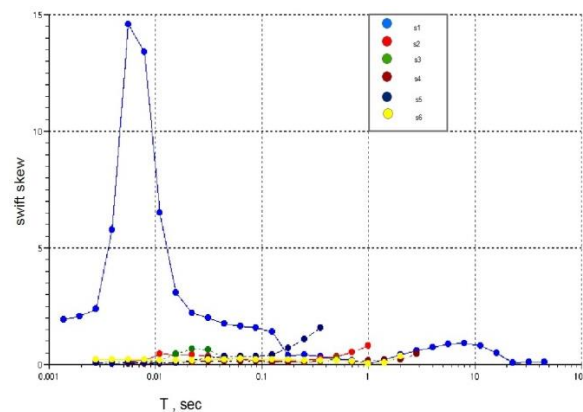
(distortion) یا رفتار سه‌بعدی ساختارهای زیر سطحی باشد (اسکویی، ۲۰۰۴). ولی در عین حال سایت‌های دیگر برای بیشتر دوره‌ها مقادیر اسکيو به نسبت کوچکی را نشان می‌دهند که تقریب مناسبی برای تحلیل یک‌بعدی یا دوبعدی از داده‌ها در منطقه به دست می‌دهد. شایان ذکر است در بعضی سایت‌ها با افزایش دوره، پارامتر اسکيو افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده این است که در اعماق تبدیلی از حالت یک‌بعدی به حالت دوبعدی رخ می‌دهد. پارامتر اسکيو برای همه ایستگاه‌ها در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است.

۶. وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک

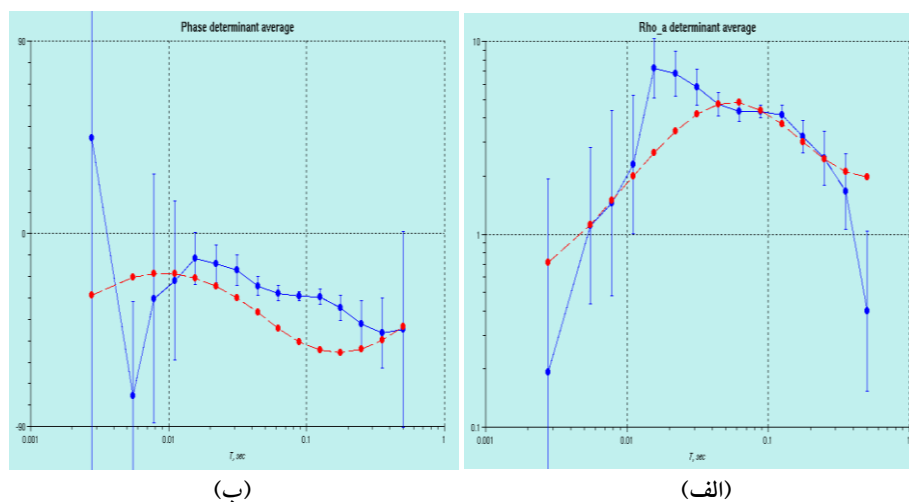
وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های دترمینان با استفاده از رهیافت پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. با استفاده از امیدانس مؤثر، مقاومت ویژه ظاهری دترمینان به عنوان ورودی برنامه‌های وارون‌سازی یک‌بعدی محاسبه می‌شود. مزیت استفاده از داده دترمینان این است که مقدار میانگینی از امیدانس را برای همه جهت‌های جریان فراهم می‌کند. به علاوه به تشخیص مُد و همچنین به تصحیحات جابه‌جایی ایستا نیازی نیست و آنالیز بعدپذیری برای مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی با استفاده از این داده‌ها به سادگی امکان‌پذیر است. داده‌های دترمینان به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز امیدانس

یک‌بعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌ها برای ایستگاه ۳ در شکل ۴ نمایش داده شده که نشان‌دهنده چگونگی تغییرات در رسانایی لایه‌های زمین در محل این ایستگاه است. براساس نتایج حاصل از برگردان یک‌بعدی داده‌ها، می‌توان اطلاعات لازم را برای مدل اولیه در برگردان دوبعدی به‌دست آورد و همان‌طور که می‌دانیم تفسیر براساس نتایج برگردان دوبعدی صورت می‌پذیرد.

به‌عنوان ورودی به برنامه وارون‌سازی پدرس (۲۰۰۴) داده شده‌اند که به‌ترتیب در شکل ۳-الف و شکل ۳-ب با رنگ آبی نشان داده شده و پاسخ مدل یک‌بعدی به‌دست‌آمده از مرحله نهایی وارون‌سازی داده‌ها با منحنی‌های سرخ‌رنگ نشان داده شده است. نمایش این داده‌ها و پاسخ مدل آن‌ها نشان‌دهنده چگونگی تطبیق مدل به‌دست‌آمده با مدل واقعی زمین است. مدل



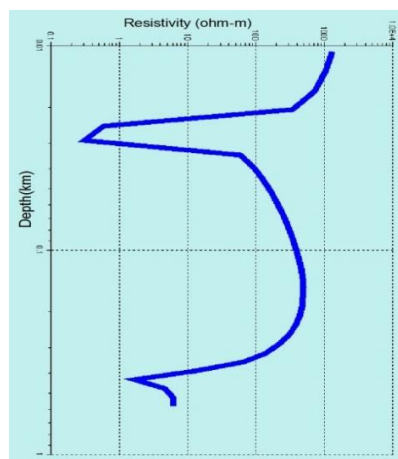
شکل ۲. پارامترهای اسکيو برای همه ایستگاه‌ها.



(ب)

(الف)

شکل ۳. وارون‌سازی یک‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک محاسبه‌شده برای سایت ۳؛ (الف) مقاومت ویژه ظاهری و (ب) فاز امپدانس.

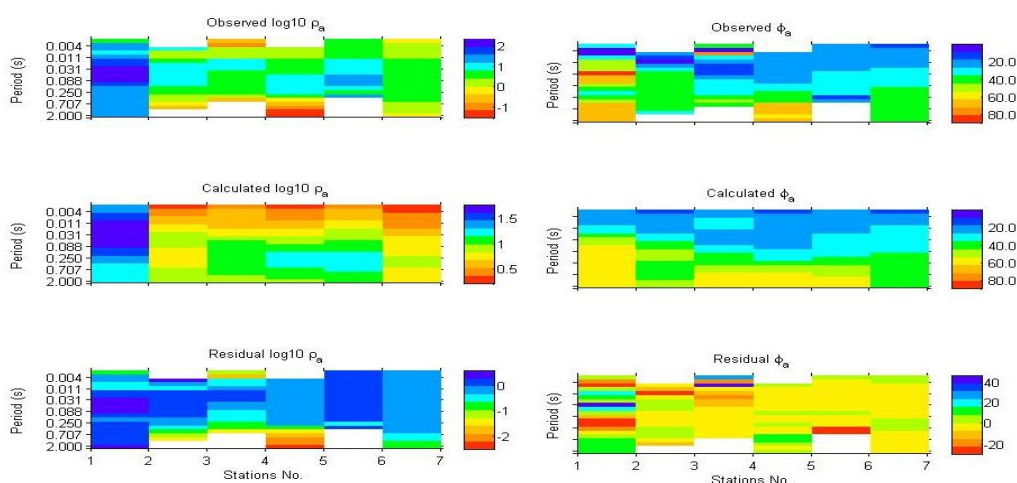


شکل ۴. مدل یک‌بعدی مقاومت ویژه حقیقی در ایستگاه ۳.

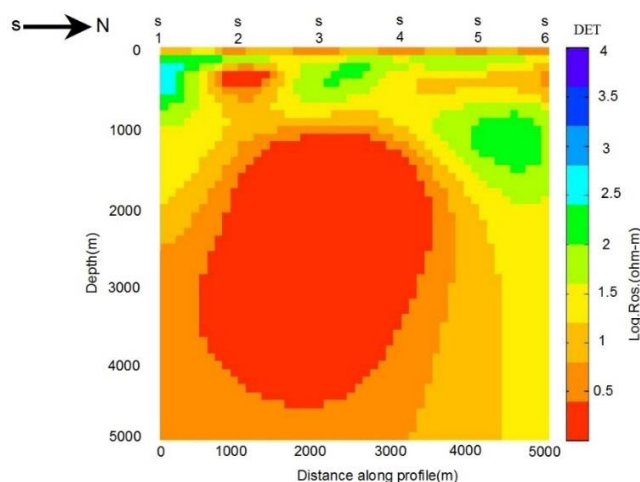
۷. وارون‌سازی دوبعدی داده‌ها

داده‌های مقاومت ویژه و فاز امپدانس با استفاده از الگوریتم REBOCC وارون‌سازی شدند. این الگوریتم در حقیقت وارون‌سازی تقلیل‌یافته برحسب روش OCCAM است که سیرپیونوارپورون و اگبرت (۲۰۰۰) آن را معرفی کردند. در وارون‌سازی دوبعدی به دلیل وجود RMS نسبتاً زیاد برابر با ۷ در مد دترمینان که ناشی از نویز موجود در منطقه برداشت داده‌هاست، از این مد برای تفسیر نهایی استفاده نشد. مقاطع حاصل از این مد در شکل ۵ نمایش داده شده است. قسمت الف این شکل شامل داده‌های صحرایی، پاسخ مدل و تفاضل ریاضی بین داده‌های صحرایی و پاسخ مدل است که برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز نمایش داده شده است و قسمت ب این شکل نشان‌دهنده مدل زمینی مقاومت ویژه حقیقی

است. با توجه به مقطع مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی مد DET، حضور لایه رسانی نازکی در نزدیکی سطح زمین و کمتر از ۵۰ متر نشانه خوبی برای نشان دادن لایه نازک نمک موجود در لایه‌های سطحی منطقه است. همچنین می‌توان به توده رسانی بزرگ موجود در زیر ایستگاه‌های ۳ و ۴ اشاره کرد که به طور شاخصی قابل مشاهده است. احتمالاً این رسانی با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه به یک دریاچه قدیمی مدفون مربوط است. لازم به ذکر است که این توده رسانا، در مد TE نیز با ابعاد کوچک‌تر قابل مشاهده است (شکل ۶-ب). توده رسانی کوچک دیگری نیز در زیر ایستگاه ۲ در هر دو مد مشاهده می‌شود. در این قسمت به همین موارد بسنده می‌کنیم زیرا مد انتخابی ما برای تفسیر مد TE است.

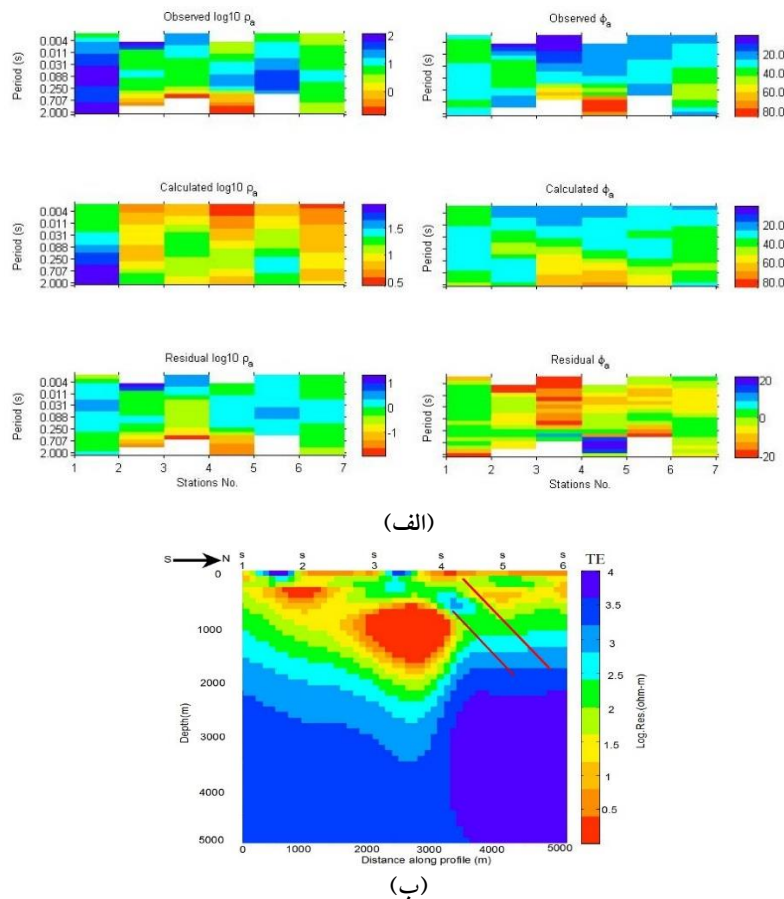


(الف)



(ب)

شکل ۵. (الف) داده‌های مشاهده‌شده، پاسخ مدل و مقدار باقی‌مانده و (ب) مقطع مقاومت ویژه برحسب عمق، حاصل از وارون‌سازی داده‌های مد DET.



شکل ۶. (الف) داده‌های مشاهده‌شده، پاسخ مدل و مقدار باقیمانده و (ب) مقطع مقاومت ویژه برحسب عمق، حاصل از وارون‌سازی داده‌های مد TE.

که برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز نمایش داده شده است و قسمت ب نشان‌دهنده مدل زمینی مقاومت ویژه حقیقی است.

۸. تفسیر بر اساس مد TE

نتایج حاصل از مقطع مقاومت ویژه مگنتوتلوریک، تأییدکننده وجود گسل در نزدیکی ایستگاه ۴ است که در مقطع MT به صورت خط قرمز نشان داده شده است. در نقشه‌های زمین‌شناسی از آن به عنوان گسل احتمالی یاد شده است که ادامه گسل تبرته است. همچنین با توجه به نقشه زمین‌شناسی، این گسل محل برخورد دو پهنه سنج-سیرجان و هفتاد قله است و شکستگی دو لبه گسل به دلیل جاری شدن سیالات به درون آن و پرشدن از سیالات، خود را به صورت لایه رسانایی بین دولاية مقاوم‌تر نشان می‌دهد که در مقطع ما دارای مقاومت تقریبی ۴۰ تا ۸۰ اهم‌متر است. در واقع این گسل مرز بین دو پهنه است که با توجه به ساختار زمین‌شناسی و مقطع

در مد TE مؤلفه میدان الکتریکی در راستای استرایک زمین‌شناسی منطقه و مؤلفه میدان مغناطیسی در راستای عمود براسترایک زمین‌شناسی منطقه فرض می‌شود. مد TE دارای طبیعت القایی است و تحت تأثیر بارهای گالوانیکی قرار نمی‌گیرد و در صورت وجود یک لایه رسانای نازک کوچک مقیاس سطحی، مد TE برخلاف مد TM تحت تأثیر تأثیرات ناشی از جابه‌جایی ایستا قرار نمی‌گیرد (جونز و دوماس، ۱۹۹۳). همچنین مد TE حساسیت خوبی به ساختارهای عمیق و ساختارهای رسانا دارد و با توجه به هدف ما که بررسی ساختارهای عمیق و زون گسلی و ساختارهای رساناست، مقطع مد TE را برای تفسیر انتخاب کردیم.

مدل‌های مقاومت ویژه فاز و مقاومت ویژه متناظر و پاسخ‌های مدل حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مد TE در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل قسمت الف شامل داده‌های صحرائی، پاسخ مدل و تفاضل ریاضی بین داده‌های صحرائی و پاسخ مدل است

ایستگاه ۲ که نشان‌دهنده زمین‌های زراعی است و احتمالاً به دلیل شرایط محیطی، خود را به صورت مقاوم نشان داده است.

Qcf: با توجه به نقشه زمین‌شناسی نشان‌دهنده یک پهنه رسی کم‌عمق است که از قبل ایستگاه ۲ شروع می‌شود و تا ایستگاه ۳ ادامه دارد. همان‌طور که می‌دانیم پهنه‌های رسی در سطح به دلیل ترکیب با مواد یون‌دار خود را به صورت رسانا نشان می‌دهند که آن را با مقاومت تقریبی ۱۰ اهم متر می‌بینیم.

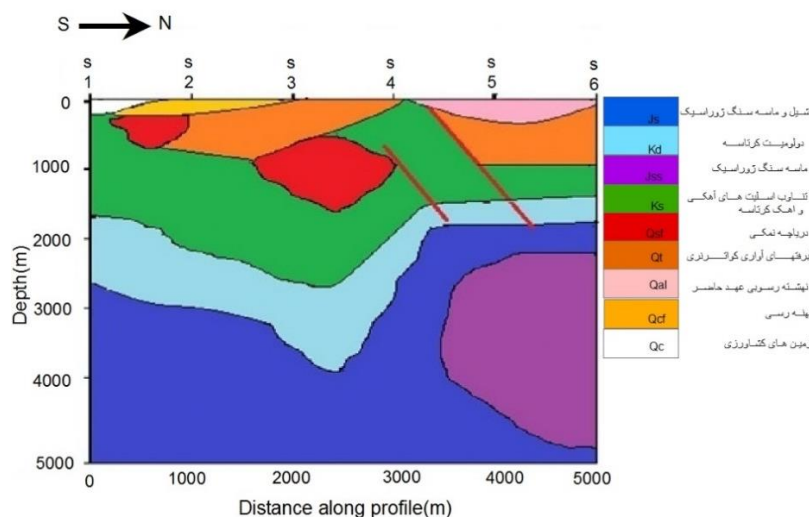
Qt: آبرفت‌های آواری کواترنری که خود را به صورت رسانا نشان می‌دهد. این آبرفت‌ها بعد از ایستگاه ۳ شروع می‌شود و گسترش سطحی کمی دارد، ولی با توجه به مقطع MT و نقشه زمین‌شناسی تقریباً تا عمق ۷۰۰ متری در سمت چپ گسل گسترش یافته است. همچنین در سمت دیگر گسل عمق بیشتری دارد. این آبرفت‌ها ناشی از گسل احتمالی بوده و دارای مقاومت تقریبی ۱۰ اهم متر هستند.

Qal: نهشته‌های رسوبی عهد حاضر که به صورت لایه نازک و رسانا در مقطع MT خود را نشان داده‌اند؛ دارای مقاومت ویژه کمتر از ۱۰ اهم متر است و با توجه به نزدیک بودن دریاچه نمک و وجود نمک در خاک منطقه تا حدودی منطقی به نظر می‌رسد.

Ks: تناوب اسلیت‌های آهکی و آهک کرتاسه است که به صورت لایه مقاوم‌تر در زیر لایه رسانا با مقاومت تقریبی ۲۰۰ اهم متر مشاهده می‌شود.

MT از عمق تقریبی بیشتر از ۱۰۰ متر شروع می‌شود (در سطح زمین رخنمون ندارد) و تا عمق تقریبی ۲۰۰۰ متر امتداد دارد. همچنین در این منطقه یک زون گسلی وجود دارد. پس احتمالاً گسل‌های فرعی دیگر نیز در اطراف این گسل وجود دارد. در زیر گسل اصلی یک خط قرمز کوچک‌تر نیز رسم شده که نشان‌دهنده یکی از این گسل‌های فرعی است که با توجه به تباین مقاومت ویژه چشمگیر در اطراف این گسل و استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، به محل این گسل پی می‌بریم. همچنین با توجه به نتایج حاصل از مگنتوتلوریک به توالی لایه‌های مختلف زمین‌شناسی و همچنین عمق لایه‌ها و سنگ بستر مقاوم پی می‌بریم. همان‌طور که در مقطع مقاومت ویژه حاصل از مد TE مشاهده می‌شود، لایه زیرین با مقاومت ویژه بالا، به سنگ بستر نسبت داده می‌شود که از سنگ‌های دولومیتی شروع شده و به ماسه‌سنگ مربوط به دوره ژوراسیک ختم می‌شود. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱) و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از داده‌های مد TE، می‌توان مقطع زمین‌شناسی در امتداد نیم‌رخ اندازه‌گیری را رسم کرد (شکل ۷). با مقایسه مقطع حاصل از برگردان دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک با مقطع زمین‌شناسی می‌توان به خوبی به شباهت بارز و چشمگیر بین این دو پی برد. با توجه به مقطع زمین‌شناسی رسم شده و مقطع مد TE می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

QC: یک ناحیه به نسبت مقاوم از ایستگاه ۱ تا نزدیک



شکل ۷. مقطع زمین‌شناسی رسم شده در امتداد پروفیل برداشت.

تباین در خواص الکتریکی مواد هستیم. وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از کد وارون‌سازی REBOCC صورت گرفت که تا عمق ۵ کیلومتر به تصویر کشیده شد.

ما از مدل دوبعدی حاصل از مد TE برای تفسیر استفاده کردیم که این مد حساسیت زیادی به توده‌های رسانا و ساختارهای عمیق دارد و با توجه به RMS پایین و اهداف مطالعه، در نتیجه این مد برای تفسیر انتخاب شد. مدل دوبعدی حاصل از مد TE سازندهایی با مقاومت ویژه کم از قبیل آبرفت‌های آواری و دریاچه نمکی و سازندهایی با مقاومت ویژه زیاد مانند دولومیت کرتاسه و ماسه سنگ ژوراسیک را مشخص کرده است. در زیر ایستگاه ۲ و ۳ به وضوح توده رسانای بزرگی مشاهده می‌شود که با توجه به زمین‌شناسی منطقه احتمالاً ناشی از دو دریاچه قدیمی مدفون است. همچنین مقطع مد TE تأییدکننده وجود گسل در نزدیکی ایستگاه ۴ است که در مقطع MT به صورت خط قرمز نشان داده شده است و در نقشه‌های زمین‌شناسی از آن به عنوان گسل احتمالی یاد شده که ادامه گسل تبرته است. همچنین با توجه به نقشه زمین‌شناسی، این گسل محل برخورد پهنه سندانج-سیرجان و پهنه هفتاد قله است که شکستگی دو لبه گسل به دلیل جاری شدن سیالات به درون آن و پر شدن از سیالات، خود را به صورت لایه‌ای رسانا بین دولا به مقاومت تر نشان می‌دهد و در واقع این گسل مرز بین دو پهنه است. همچنین ما در این منطقه یک زون گسلی داریم. پس احتمالاً گسل‌های فرعی دیگری نیز در اطراف این گسل وجود دارد. در زیر گسل اصلی یک خط قرمز کوچک تر نیز رسم شده که نشان‌دهنده یکی از این گسل‌های فرعی است. با توجه به تباین مقاومت ویژه چشمگیر در اطراف این گسل و اطلاعات زمین‌شناسی به محل این گسل پی می‌بریم.

یکی از نتایج درخور توجه این تحقیق، مشخص شدن عمق تقریبی سنگ کف است که به صورت لایه‌های با مقاومت بالا در مقطع مشخص هستند و با توجه به مقطع زمین‌شناسی رسم شده براساس مقطع مد TE، از عمق تقریبی ۱ کیلومتر لایه‌ها به ترتیب مقاوم‌تر شده‌اند که

پس از K_s لایه‌ها به ترتیب مقاوم‌تر شده که نشان‌دهنده شروع سنگ‌بستر مقاوم است. این مقاومت به ترتیب به K_d دولومیت‌های کرتاسه با مقاومت تقریبی بیشتر از ۶۵۰ اهم‌متر و سپس به J_s شیل و ماسه سنگ ژوراسیک با مقاومت تقریبی ۳۰۰۰ اهم‌متر و در نهایت به یک لایه بسیار مقاوم تر J_{ss} ماسه‌سنگ ژوراسیک با مقاومت تقریبی ۱۰۰۰۰ اهم‌متر نسبت داده می‌شود. همچنین یکی از نتایج این بررسی تشخیص دو منطقه بسیار رسانای Q_{sf} است که در مقاطع دو دریاچه قدیمی نمکی تشخیص داده شده که به دلیل کافی نبودن مقطع برداشتی قضاوت در مورد آن‌ها کمی مشکل است ولی احتمالاً محدوده بزرگ‌تر بخشی از دریاچه نمک در مجاورت پروفیل برداشتی است. اگر توده رسانای کوچک‌تر نیز یک دریاچه قدیمی باشد، دو دریاچه قدیمی کشف شده است که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه غیرمحتمل نیست. در زیر منطقه نمکی، گودی وجود دارد که با توجه به داده‌های کم حکایت از گسل دارد و فقط زمانی که مقطع کامل برداشت شود، می‌توان پاسخ دقیق داد. با وجود این سنگ کف ناهموار است و گسل به نظر می‌رسد. گسل‌ها نقش مهمی در بالا آوردن سنگ‌های قدیمی داشته‌اند. به عبارتی به نظر می‌رسد گسل‌ها نرمال نباشند و از نوع تراستی باشند که قضاوت در این خصوص با کامل شدن مقاطع مگنتوتلوریک ممکن می‌شود؛ البته پدیده دیگر در مقطع MT لایه‌ای بودن ساختار است که به خوبی نشان‌دهنده ماهیت رسوبی منطقه است.

۹. نتیجه گیری

در این مقاله روش اکتشافی مگنتوتلوریک به منظور آشکارسازی ساختارهای زیر سطحی در امتداد یک پروفیل شمالی-جنوبی در دشت میقان اراک استفاده و داده‌ها

در بازه دوره‌ای ۰/۰۰۱ تا ۲/۸۲۸ ثانیه جمع‌آوری شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده سودمندی روش مگنتوتلوریک در بررسی‌های زمین‌شناسی است. در این روش برای به تصویر کشیدن ساختارهای زیرسطحی، نیازمند یک

از مد TE تأییدکننده رسوبی بودن ساختارهای زمین‌شناسی منطقه است.

مراجع

میرزایی، م. و قدیمی، ف.، ۱۳۸۵، گزارش زمین‌شناسی: بررسی گسل‌های تبرته و تلخاب، دانشگاه اراک.

- Cantwell, T. and Madden, T. R., 1960, Preliminary report on crustal magnetotelluric measurements: *Geophysics*, 65(12), 4202-4205.
- Jones, A. G. and Dumas, I., 1993, Electromagnetic images of a volcanic zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 81, 289-314.
- Oskooi, B., 2004, A broad view on the interpretation of electromagnetic data (VLF, RMT, MT, CSTMT), PhD Thesis, Uppsala University, Sweden.
- Pedersen, L. B., 2004, Determination of the regularization level of truncated singular-valubhe decomposition inversion, The case of 1D inversion of MT data, *Geophys. Prospect*, 52, 261-270.
- Pedersen, L. B. and Engels, M., 2005, Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor,

نشان‌دهنده شروع سنگ بستر مقاوم است. این سنگ‌بستر به ترتیب به دولومیت‌های کرتاسه با مقاومت تقریبی بیشتر از ۶۵۰ اهم‌متر و سپس به شیل و ماسه سنگ ژوراسیک با مقاومت ویژه تقریبی ۳۰۰۰ اهم‌متر و در نهایت به یک لایه بسیار مقاوم‌تر از ماسه سنگ ژوراسیک نسبت داده می‌شود. شایان ذکر است که مقطع مقاومت ویژه حاصل

- Geophysics*, 70, G33-G41.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data, *Geophysics*, 65, 791-803.
- Smirnov, M. Yu., 2003, Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point, *Geophysics. J. Int.*, 152, 1-7.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, M. N. Nabighian, Ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 2(B), 641-711.