

ارزیابی تعیین بعد ساختارهای هیدروکربوری زیر سطحی با استفاده از پارامترهای مگنتوتلوریک

شهاب البرزبان^{*}، علی نجاتی • دانشگاه شاهرود
مهر داد ایوبی • مدیریت اکتشاف

علی مرادزاده • دانشگاه تهران
رضا قاندرحمی • دانشگاه لرستان

چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل پیدایش انواع مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک، روش‌های مختلفی برای تعیین بعد ساختارهای زیرسطحی به وجود آمده و برای بهبود این مدل‌سازی‌ها، آنالیز ابعادی از اهمیت بالایی برخوردار شده است. در این مطالعه، برای آنالیز ابعادی ساختارهای منطقه گچساران از روش‌های متعددی از قبیل چولگی^۱، بیضی‌وارگی^۲، چولگی حساس به فاز^۳، پارامترهای ابعادی نرمال شده D_p, D_p, D_p و کد تعیین بعد والدیم^۴ استفاده شد. در نهایت، تمام روش‌های فوق بر سه بعدی بودن منطقه دلالت داشتند که البته در بعضی نقاط دارای ساختار دوبعدی هم بودند. بنابراین، جهت انجام مدل‌سازی هر چه بهتر ساختارهای منطقه، مدل‌سازی سه‌بعدی و یا مدل‌سازی دوبعدی مناسب جهت ساختارهای سه‌بعدی، پیشنهاد می‌گردد.

اطلاعات مقاله

* دریافت:

۱۳۹۳/۱۰/۲۰

* ارسال برای داوری:

۱۳۹۳/۱۱/۸

* پذیرش:

۱۳۹۴/۳/۱۹

واژگان کلیدی

مگنتوتلوریک
چولگی
بیضی‌وارگی
چولگی حساس به فاز
شاخص‌های ابعادی
تعیین بعد والدیم

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (shahab.alborzian@gmail.com)

داده‌ها می‌تواند در پیشگویی مقادیر مقاومت ویژه، خطاهای بزرگی را منجر شود. در این مطالعه که هدف اصلی آن بررسی ابعاد ساختارهای زیرسطحی در منطقه گچساران می‌باشد، تعدادی از روش‌های موثر در تعیین بُعد، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ناحیه زاگرس چین خورده و در یکی از میادین نفتی جنوب غرب کشور واقع شده و داده‌های مگنتوتلوریک آن در سال ۱۳۹۰ توسط یک شرکت چینی برداشت گردیده است. در این منطقه، رخنمون وسیع سازند گچساران در سطح، فشارهای تکنونیک، چین خوردگی‌های شدید و گسل‌های روانه مشکلاتی از قبیل عدم موفقیت در برداشت و تفسیر عملیات لرزه‌نگاری را به دنبال داشته است. به دلیل پیچیدگی بالای منطقه، مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک و مخصوصاً تعیین بعد دقیق ساختارهای آن (برای انجام بهترین مدل‌سازی) بسیار حائز اهمیت است.

سوداژهای مگنتوتلوریک در این منطقه با فواصل ۲۰۰ متر از هم برداشت شده‌اند که موقعیت خط برداشت ۸۸۰۹، نقشه زمین‌شناسی و سازندهای منطقه در شکل ۱- نشان داده شده است [4].

۲- روش تحقیق

در روش مگنتوتلوریک کمیت‌هایی وجود دارد که با استفاده از این پارامترها می‌توان ابعاد ساختارهای زیرسطحی منطقه را مورد بررسی قرار داد که در اینجا این پارامترها بررسی می‌شود. اما قبل از تعریف و بررسی این پارامترها، به بررسی دو ترکیب نامتغیر چرخشی Z_1 و Z_2 و متغیرهای چرخشی Z_3 و Z_4 ، عناصر تانسور امپدانس می‌پردازیم که به صورت زیر تعریف می‌شوند [5].

$$Z_1 = \frac{(Z_{yy} - Z_{xx})}{2} = \frac{(Z_{xx}(\theta) - Z_{yy}(\theta))}{2} \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{(Z_{xx} + Z_{yy})}{2} = \frac{(Z_{xx}(\theta) + Z_{yy}(\theta))}{2} \quad (6)$$

$$Z_3 = \frac{(Z_{xy} + Z_{yx})}{2} \quad (7)$$

$$Z_4 = \frac{(Z_{xx} - Z_{yy})}{2} \quad (8)$$

۲-۱- چولگی

این کمیت یک پارامتر نامتغیر چرخشی است و از رابطه ۹- محاسبه می‌شود [6]. این پارامتر در صورتی که برابر صفر و یا نزدیک صفر باشد، می‌تواند بر غیر سه بعدی بودن ساختارهای منطقه دلالت داشته باشد. اما اگر مقدار آن از $\frac{1}{3}$ بیشتر شود، باید محدوده مورد نظر به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گیرد یا حداقل در هنگام مدل‌سازی دویبعدی، محدوده اثرات تقریب مدل سه بعدی توسط

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی با چشمه طبیعی می‌باشد که از اوایل سال ۱۹۵۰ در اکتشاف نفت، منابع معدنی و منابع ژئوترمال مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش می‌توان به توانایی آن در شناسایی ساختارهای کم عمق و بسیار عمیق و تعیین مشخصه‌های این ساختارها اشاره کرد که از طریق دیگر روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی غیرقابل دسترسی است. همچنین، این روش هیچ‌گونه آثار زیست‌محیطی در بر ندارد. این روش با توجه به عمق نفوذ بالایی که دارد و همچنین، توانایی آن در مناطق دارای گسل‌های رورانده و دارای رسوبات تبخیری، در اکتشاف منابع هیدروکربوری مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]، [2].

این روش از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی متغیر با زمان، اطلاعاتی راجع به مقادیر مقاومت ویژه لایه‌های زیرسطحی به دست می‌آورد. بدین منظور تغییرات زمانی میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (M) ثبت می‌شوند. بعد از انتقال سری‌های زمانی به حوضه بسامد، تانسور امپدانس (Z) ارتباط بین مؤلفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به عنوان تابعی از بسامد به صورت زیر تعیین می‌کند:

$$\begin{pmatrix} E_x(w) \\ E_y(w) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(w) & Z_{xy}(w) \\ Z_{yx}(w) & Z_{yy}(w) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x(w) \\ B_y(w) \end{pmatrix} \quad (1)$$

که برای یک ساختار دویبعدی در حالت دستگاه مختصات اصلی (principal) با محور x در جهت امتداد ساختار، به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

همچنین مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho_{a,ij}^{MT}(w) = \frac{1}{\mu_0 w} |Z_{ij}(w)|^2, \quad i, j = x, y \quad (3)$$

$$\phi_{ij} = \text{phase}(Z_{ij}) \quad (4)$$

نسبت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر فرکانس کمیت مختلطی به نام امپدانس الکتریکی می‌باشد. با استفاده از این امپدانس می‌توان مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس را در هر فرکانس به دست آورد و با استفاده از آن، داده‌های مگنتوتلوریک را مدل‌سازی نمود [3]. اما برای به دست آوردن یک مدل مناسب از داده‌های مگنتوتلوریک باید اطلاعاتی از ابعاد ساختارهای زیرسطحی منطقه به دست آوریم در غیر این صورت مدل‌سازی



فوقانی چولگی را برای ساختارهای دوبعدی بین ۰/۱۲ تا ۰/۲ تعریف کردند [9]، در حالی که دیگر محققان با توجه به تأثیر اغتشاشات ناهمگنی‌های سطحی، محدوده این پارامتر را بین ۰/۰۱ تا ۰/۷۲ تعریف نمودند [10]. پس به طور قطع با استفاده از این پارامتر نمی‌توان سه بعدی بودن ساختار زیرسطحی را مشخص نمود. تجربه حاصل از مدل‌سازی داده‌های واقعی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، مقادیر متوسط چولگی حدود ۰/۴ و یا حتی بیش تر است در حالی که سایر شواهد اشاره به ساختارهای یک و یا دوبعدی دارند. دلیل این مسئله حساسیت بیش از حد پارامتر چولگی به نویزهای موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده مگنتوتلوریک است [8].

۲-۳- چولگی حساس به فاز

به دلیل اینکه کمیت‌های چولگی و بیضی‌وارگی برای تعیین بعد ساختارهای زیرسطحی خیلی قابل اعتماد نیستند، کمیت چولگی حساس به فاز (رابطه-۱۱) به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری جدید تعیین بعد توسط بحر در سال ۱۹۸۸ معرفی شد که به صورت زیر تعریف گردید [11].

$$\eta = \frac{[\text{Im}(Z_3, Z_4)] - [\text{Im}(Z_1, Z_2)]^2}{|Z_1|} \quad (11)$$

که در آن * به مزدوج مختلط عبارت اشاره می‌کند. مقادیر چولگی حساس به فاز در شکل-۲ در تمام سونداژها تقریباً روی ۰/۳ نوسان دارد و می‌توان گفت که ساختارهای منطقه دوبعدی-سه بعدی است. این پارامتر از لحاظ مقداری نسبت به پارامترهای قبلی تغییرات و نوسانات بسیار کمتری دارد و پارامتر قابل اعتمادتری نشان می‌دهد. اما برای بررسی آنالیز ابعادی دقیق‌تر، نیاز به روش‌های مکمل و کارآمدتر حس می‌شود.

۲-۴- اندیس‌های وزنی نرمال شده D_1, D_2, D_3

این پارامترها نیز از روابط زیر به دست آمده و سهم هر یک از ساختارهای یک، دو و سه بعدی زمین را نشان می‌دهند. مقادیر بزرگ D_2 و D_3 (بیشتر از ۰/۲) بیانگر وجود ساختارهای دوبعدی و یا سه بعدی در منطقه است ولی اگر کیفیت داده‌های برداشت شده خیلی بالا باشد، این مقدار به ۰/۱ کاهش می‌یابد. همچنین، برای ساختارهای یک بعدی شرایط $D_1 > D_2 > D_3$ قابل انتظار است [12]. روابط این شاخص‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$D_1 = \frac{|Z_1|}{\gamma} \quad (12)$$

$$D_2 = \frac{|M_1|}{\gamma} \quad (13)$$

$$D_3 = \frac{|Z_2|}{\gamma} \quad (14)$$

$$D_4 = \frac{|M_2|}{\gamma} \quad (15)$$

مدل دوبعدی در نظر گرفته شود تا مدل‌سازی دچار خطاهای فاحش نشود [7].

$$S = \frac{|Z_2|}{|Z_1|} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (9)$$

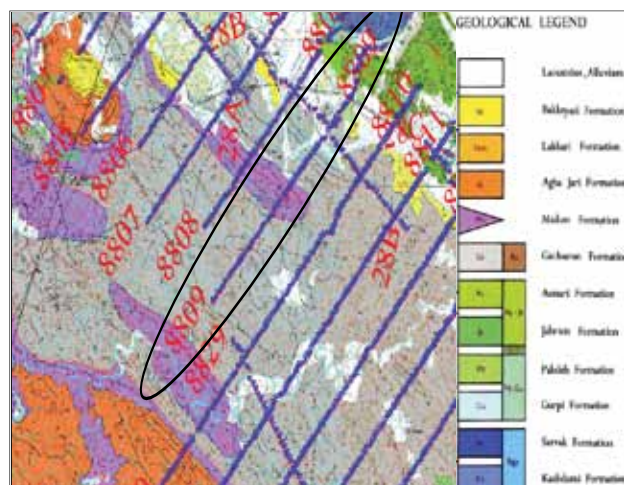
در شکل-۲ مقادیر محاسبه شده چولگی، در سونداژهای تعیین شده در امتداد پروفیل ۸۸۰۹ نشان داده شده است. به جز سونداژهای ابتدایی و انتهایی پروفیل، مقادیر چولگی در اکثر فرکانس‌ها بیش تر از ۰/۳ است که می‌تواند ناشی از ساختار سه بعدی منطقه و یا به نویز آلوده بودن داده‌ها باشد و در ابتدا و انتهای پروفیل ساختار دوبعدی مشاهده می‌شود.

۲-۲- بیضی‌وارگی

کمیت بیضی‌وارگی نیز نامتغیر چرخشی است و مانند چولگی برای مدل‌های یک بعدی و دوبعدی مقداری برابر صفر و یا نزدیک صفر دارد. به همین خاطر شاخص خوبی برای تشخیص سه بعدی بودن محیط مورد مطالعه می‌باشد و از رابطه-۱۰ قابل محاسبه است [8,9].

$$E = \frac{|Z_4(\theta)|}{|Z_3(\theta)|} \quad (10)$$

مقادیر بیضی‌وارگی در تمام سونداژهای مشخص شده در شکل-۲ از ۰/۳ بیش تر بوده که دلیلی بر سه بعدی بودن منطقه است. همچنین، مقادیر زیاد این پارامتر در سونداژها می‌تواند ناشی از ناهمگنی باشد. دو پارامتر فوق می‌توانند در تعیین ابعاد ساختارها مفید باشند، اما پارامترهای قابل اعتمادی برای تعیین ساختارهای زیرسطحی نیستند. زیرا اگر داده‌ها آلوده به نویز باشند و یا متأثر از ناهمگنی الکتریکی نزدیک سطح زمین گردند، پارامتر چولگی دیگر برای ساختار دوبعدی صفر نمی‌شود. ایراد دیگری که به این کمیت وارد است، عدم توافق در محدوده آن می‌باشد. برخی از محققان محدوده



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه با نمایش محل خط برداشت ۸۸۰۹ [۴]

که در آن:

$$\gamma = |Z_1| + |M_1| + \frac{|Z_2 + M_2|}{2} \quad (16)$$

$$M_1 = \frac{[Z'_{xy}(\theta_0) - Z'_{yx}(\theta_0)]}{2} \quad (17)$$

$$M_2 = \frac{[Z'_{xx}(\theta_0) - Z'_{yy}(\theta_0)]}{2} \quad (18)$$

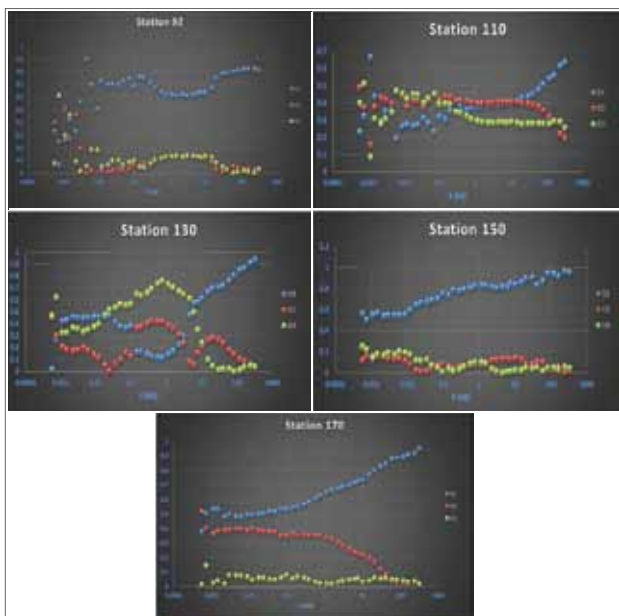
و θ_0 زاویه‌ای است که در آن به بیشینه مقدار خود می‌رسد [۷]. اندیس‌های D_1 و D_2 رفتار عکس با هم دارند و مقادیر بزرگ D_2 و D_3 (بیشتر از ۰/۲) بیانگر این است که ساختارهای دوبعدی و سه بعدی نیز در منطقه وجود دارد [۱۳]. این رفتارها در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین، مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۲ پارامترهای D_2 و D_3 سه بعدی بودن منطقه را دوباره تأیید می‌کند و اینکه یک بعدی نشان دادن ساختارها در فرکانس‌های اولیه سونداژهای میانی پروفیل، می‌تواند ناشی از دقت و کارایی این روش نسبت به روش‌های قبلی باشد.

۳- تعیین بعد والدیم

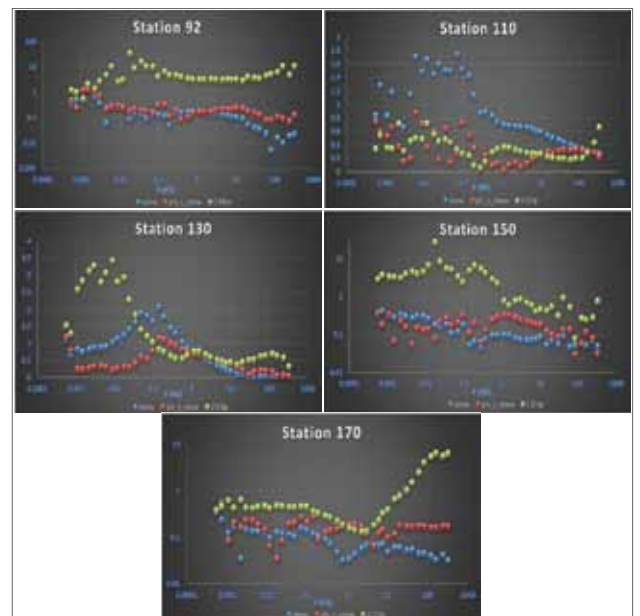
کد والدیم یک برنامه تحت زبان برنامه‌نویسی فورترن^۵ می‌باشد که برای آنالیز ابعادی ساختارهای زیرسطحی با توانایی تشخیص وجود ناهمگنی‌های سطحی، نوشته شد. والدیم ابزاری برای انجام آنالیز ابعادی از یک مجموعه داده مگنتوتلوریک مطابق با ضرایب ثابت

چرخشی وال (I_1 تا I_7 و Q) و با لحاظ کردن مقادیر خطا در داده‌ها می‌باشد [14]. توابع اصلی این برنامه شامل محاسبه ضرایب ثابت چرخشی وال بر اساس تانسورهای مگنتوتلوریک و تخمین آنالیز ابعادی بر اساس معیارهای این ضرایب و مقادیر حد و خطاهاست. تخمین خطا روی نامتغیرها به وسیله انتشار خطای کلاسیک انجام شده است و خطاهای پارامترهای وابسته (امتداد ساختار و اعوجاج پارامترها) از خطای گوسی تصادفی استفاده می‌کند [15,16]. این برنامه به کمک توابع ویور و همکاران با توجه به خطای داده‌ها ایجاد شده است و نوعی از تعیین بعد را محاسبه می‌کند که مطابق با هر سونداژ مگنتوتلوریک و بازه‌های فرکانسی متفاوت می‌باشد [17]. همچنین، پارامترهای وابسته از قبیل جهت امتداد و پارامترهای اعوجاج، با مقادیر خطایشان را محاسبه می‌کند. بنابراین، در نهایت، نتایج تعیین بعد برای هر سونداژ و به‌طور جداگانه در فرکانس‌های متفاوت انجام می‌شود [۱۴]. فلوجارت کلی این برنامه در شکل ۴ توضیح داده شده است.

در جدول ۱ نتایج این آنالیز ابعادی دیده می‌شود. براساس آن، در فرکانس‌های مختلف (عمق‌های متفاوت) ابعاد ساختار تعیین گردیده که اکثراً سه بعدی می‌باشد. در برخی فرکانس‌ها نیز نتایج به صورت $3D/2D$ یا $3D/2D1D$ نشان داده شده و نشان‌دهنده مناطق با ساختار اصلی یک بعدی یا دوبعدی است که تحت تأثیر ناهمگنی‌های سه بعدی قرار گرفته است. با توجه به این آنالیز ابعادی می‌توان نتیجه گرفت که تمام منطقه را ترکیبی از ساختارهای سه بعدی و در بعضی از نقاط، همراه با ساختارهای دو بعدی تحت تأثیر ساختارهای سه بعدی، در بر گرفته است.



شکل ۳ | نمودارهای اندیس‌های وزنی نرمال شده D_1, D_2, D_3 در سونداژهای پروفیل ۸۸۰۹



شکل ۲ | نمودارهای چولگی، بیضی‌وارگی و چولگی حساس به فاز در سونداژهای پروفیل ۸۸۰۹



نتیجه‌گیری

۱- برای تهیه یک مدل دقیق از داده‌های مگنتوتلوریک، آنالیز ابعادی ساختارهای زیرسطحی نقش بسیار ویژه‌ای دارد. قبل از هرگونه مدل‌سازی، این آنالیز باید صورت پذیرد و با توجه به نتایج آن، مدل مناسب منطقه تهیه گردد.

۲- با بررسی داده‌های مگنتوتلوریک خط برداشت ۸۸۰۹ منطقه گچساران و همچنین، محاسبه پارامترهای چولگی، بیضی‌وارگی، چولگی حساس به فاز جهت تعیین بعد ساختارهای منطقه، مشخص گردید که مقادیر پارامترهای فوق اکثر ساختارهای سه بعدی و دوبعدی را نشان می‌دهند. اما پارامترهای چولگی و بیضی‌وارگی به دلیل حساسیت زیاد به نویز و نوسان زیاد مقادیرشان، روش مناسبی برای آنالیز ابعادی به‌شمار نمی‌روند.

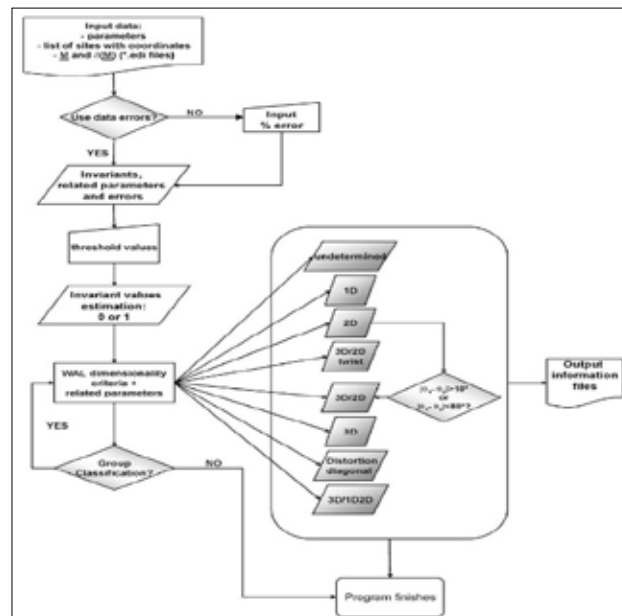
۳- پارامترهای ابعادی نرمال شده D_1, D_2, D_3 در تمام سونداژها و در اکثر فرکانس‌ها ساختارهای منطقه را سه بعدی تشخیص داده است. اما در فرکانس‌های ابتدایی سونداژها (نزدیک سطح) شاهد وجود ساختارهای یک بعدی هستیم که این امر می‌تواند دقت بالاتر این روش نسبت به پارامترهای فوق باشد.

۴- در نهایت، برنامه آنالیز ابعادی فورترین به‌عنوان جدیدترین روش تعیین بعد ساختارهای زیرسطحی، به جز ساختارهای یک بعدی در فرکانس‌های اولیه (نزدیک سطح) سونداژهای میانی، در تمام منطقه، ساختارهای سه بعدی و در بعضی نقاط، ساختارهای دوبعدی را نشان می‌دهد.

نمایش نتایج تعیین بعد والدیم در تمام فرکانس‌ها



F(Hz)	Station 92	Station 110	Station 130	Station 150	Station 170
320	3D	3D	1D	1D	3D
240	2D	3D	1D	UNDETERM	3D
160	3D	3D	3D/2D	1D	3D
120	3D	3D	3D	UNDETERM	3D
80	3D	3D	3D	UNDETERM	3D
60	3D	3D	3D	3D	3D
40	3D	3D	3D	3D	3D
30	3D	3D	3D/2D	UNDETERM	3D
20	3D	3D	3D	3D/2D1D	3D
15	3D	3D	3D	3D	3D/2Dtw
10	3D	3D	UNDETERM	3D	3D/2D
7.5	3D	3D	UNDETERM	3D	3D
6	3D	3D	UNDETERM	3D	3D/2Dtw
4.5	3D	3D/2D	UNDETERM	3D	3D/2Dtw
3	3D	3D/2D	UNDETERM	3D	3D/2Dtw
2.25	3D	3D	UNDETERM	3D	3D
1.5	3D	3D/2D	UNDETERM	UNDETERM	3D
1.13	3D	3D/2D	UNDETERM	UNDETERM	3D
0.75	3D	3D	UNDETERM	3D	3D
0.56	3D	3D/2D	UNDETERM	3D	3D
0.37	3D/1D2D	3D/1D2D	UNDETERM	3D/2Dtw	3D
0.281	UNDETERM	3D/2Dtw	UNDETERM	3D/2Dtw	3D/2Dtw
0.187	3D	3D	3D	3D	3D/2Dtw
0.141	3D	3D	UNDETERM	3D/2D	3D
0.094	3D	3D	3D	3D	3D
0.07	3D	UNDETERM	3D	3D	3D
0.047	3D	3D/2Dtw	3D	3D	3D
0.035	3D	3D	3D	3D	3D
0.0234	3D	3D	3D	3D	3D/2Dtw
0.0176	3D/1D2D	3D	3D	3D/2Dtw	3D/2Dtw
0.0117	3D	3D	3D	3D	3D/2Dtw
0.0088	3D	3D	3D	3D	3D
0.0059	3D	3D	3D	UNDETERM	3D
0.0044	UNDETERM	UNDETERM	3D	UNDETERM	3D
0.00293	3D	3D/2D	3D	UNDETERM	3D
0.0022	3D	3D	3D	3D	3D
0.00146	3D	3D	3D	3D/2Dtw	UNDETERM
0.0011	3D	UNDETERM	3D	3D	3D/2D
0.00073	3D	3D	UNDETERM	3D	3D
0.00055	3D	3D	3D	3D	3D



شکل ۴ | فلوجارت کامل کد تعیین بعد والدیم [۱۴]

- ۵- ساختارهای زیرسطحی منطقه، عموماً سه بعدی بوده که در بعضی نقاط ساختار دوبعدی هم دیده می‌شود و به همین دلیل جهت مدل‌سازی ساختارهای منطقه باید در صورت امکان از مدل‌سازی سه بعدی و یا مدل‌سازی‌های دوبعدی مناسب ساختارهای سه بعدی، استفاده گردد.
- ۶- برای یک آنالیز ابعادی دقیق ساختارهای زیرسطحی، ترکیب روش‌های چولگی حساس به فاز، پارامترهای ابعادی نرمال شده D_1, D_2, D_3 و برنامه تعیین بعد والدیم پیشنهاد می‌گردد. ■

پانویس‌ها

- | | |
|-------------------------|------------|
| 1. Skew | 4. Waldim |
| 2. Ellipticity | 5. Fortran |
| 3. phase Sensivity Skew | |

منابع

- [1] Vozoff K., "The Magnetotelluric Method in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics", M. N. Nabighian, Ed. (SEG, Tulsa), (1991), 2, chapter 8.
- [2] Orange A.S., "Magnetotelluric exploration for hydrocarbons", Proc. IEEE, (1989), 77, February.
- [3] Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. and Pozdnjakova E.E., "On two dimensional interpretation of magnetotelluric soundings", Geophysical Journal International, (1998), 133, 585606-.
- [4] NIOC Reports.
- [5] Kaufman A.A., and Keller G.V., "The Magnetotelluric sounding method", Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, (1981), 595.
- [6] Swift C.M., Jr., Ph.D. thesis: "A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern united states", Princeton University, (1967).
- [7] مرادزاده ع.، وایت آ.، "ارزیابی تعیین بعد ساختارهای ژئوالکتریک زیرسطحی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک"، مجله علوم و فنون دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۸۴)، شماره ۶ و ۷، صفحات ۶۵-۵۹.
- [8] Kao D., Orr D., "Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England", Geophys. J. R. astr. Soc., 70: 323337-.
- [9] Hohmann G.w., Ting S.C., "Integral equation modeling of three-dimensional Magnetotelluric response", Geophysics, (1981), 46, 182197-.
- [10] Hermance J.F., "The asymptotic response of three-dimensional basin effects to Magnetotelluric field at long period: The effects of current channeling", Geophysics, (1982), 47, 15621573-.
- [11] Bahr K., "Interpretation of the Magnetotelluric impedance tensor, regional induction and local telluric distortion", J. Geophys, (1988), 62: 119-127.
- [12] Beamish D., "Geoelectric structural dimensions from Magnetotelluric data: Methods of estimation, old and new", Geophysics, (1986), 51: 12981309-.
- [۱۳] هاشمی ن.، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری کپه داغ غربی"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۹۱).
- [14] Marti A., Queralt P., Ledo J., "WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor", Computers & Geosciences, (2009), 35: 22952303-.
- [15] Marti A., Queralt P., Roca E., "Geo electric dimensionality in complex geologic areas: application to the Spanish Betic Chain", Geophysical Journal International, (2004), 157, 961-974.
- [16] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., "Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press, (1992), 992 pp.
- [17] Weaver J.T., Agarwal A.K., Lilley F.E.M., "Characterisation of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants", Geophysical Journal International, (2000), 141, 321-336.