



مقاله پژوهشی

تفسیر توأمان داده های الکترومغناطیسی با عدد القای پایین ($EM-LIN$) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)؛ مطالعه موردی: منطقه ای در آفریقای جنوبی

حسینعلی قاری*

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: مهر ۱۴۰۲، پذیرش: تیر ۱۴۰۳)

چکیده

تفسیر کمی داده های دو روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیسی با عدد القای پایین از طریق معکوس سازی میسر است. معکوس سازی داده های دو روش با دو مشکل عدم یکتایی و ناپایداری مواجه است که برای رفع آنها باید از قیدها و اطلاعات اولیه بهره گرفته شود. مسئله مهم تر آن است که داده های یک روش ژئوفیزیکی در موارد زیادی منجر به تفسیر مطلوبی از ساختار زیر سطح نمی شود، بنابراین ترکیب داده های ژئوفیزیکی اجتناب ناپذیر است. تفسیر توأمان داده های دو یا چند روش ژئوفیزیکی یکی از متداول ترین راهکارهای شناسایی هر چه بهتر بی هنجاری های زیر سطح زمین است. در این مقاله از تفسیر توأمان داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیسی با عدد القای پایین برای منطقه ای در کشور آفریقای جنوبی استفاده می شود. در این ناحیه شناسایی دایک دولریتی مهم ترین هدف در اکتشاف آب زیرزمینی است که آشکارسازی آن از طریق فرآیند معکوس سازی داده های مذکور صورت می گیرد. برای معکوس سازی داده های دو روش از الگوریتم کمینه طول وزن دهی شده استفاده می شود و تابع وزن دهی عمقی به عنوان ماتریس وزن دهی مدل بکار گرفته می شود. معکوس سازی داده های الکترومغناطیسی با عدد القای پایین نشانگر دایکی نسبتاً ضخیم در گستره عمقی کمتر از ۵ تا ۱۵ متر و با گسترش افقی از ۱۸۵ تا ۲۰۰ متر (ضخامتی نزدیک به ۱۵ متر) است. روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی محیطی لایه ای را بازایی می کند و در لایه رسانای نزدیک به سطح دایک مقاومی تا نزدیک سطح قابل مشاهده است. درواقع روش الکترومغناطیسی دایک را بهتر بازسازی می کند و تنها روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی ساختار لایه ای را نشان می دهد.

کلمات کلیدی

روش الکترومغناطیسی با عدد القای پایین، روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، تفسیر توأمان، معکوس سازی، آفریقای جنوبی

*عهده دار مکاتبات: hosseinali.ghari@gmail.com

DOI: 10.22034/ANM.2024.20684.1610

داشت که در بیشتر موارد تفاوت مدل‌های نهایی قابل‌اغماض است. در این مقاله تفسیر توأمان داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس با عدد القای پایین (EM-LIN)^۵ برای سایت مورگنزن فارم^۶ در کشور آفریقای جنوبی به کار گرفته می‌شود.

```

graph LR
    A[Geophysical data I] --> B[Inversion model of data I]
    C[Geophysical data II] --> D[Inversion model of data II]
    B --> E[Brain Icon]
    D --> E
    F[Geological constraints] --> E
    E --> G[Final model]
  
```

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل سازی پیشرو روش تو موگرافی مقاومت ویژه الکتریکی

در این روش، یک مدل معین متشکل از دو بخش است: زمینه و ناحیه شامل بی‌هنجاری؛ زمینه را به‌عنوان چارچوب مرجع در نظر گرفته و میدان پراکنده‌شده حاصل از ناحیه بی‌هنجاری به‌عنوان پاسخ پیشرو محاسبه می‌شود [۱۷]. با توجه به آنکه معادلات ماکسول نسبت به رسانندگی الکتریکی غیرخطی هستند، در نتیجه مسئله مدل‌سازی روش

برای برطرف کردن این دو مشکل از قیدهای مختلف در قالب منظم‌سازی و اطلاعات اولیه بهره گرفته می‌شود. تفسیرهای موفقیت‌آمیزی از بی‌هنجاری‌های زیر سطح از طریق معکوس‌سازی داده‌های یک روش ژئوفیزیکی در طی دهه‌ها ارائه داده‌اند [۲-۶]. اگرچه موارد زیادی وجود دارند که معکوس‌سازی یک روش ژئوفیزیکی منجر به تصویر با قدرت تفکیک بالایی از زیر سطح زمین نمی‌شود تا از طریق آن بتوان تفسیر مناسبی از بی‌هنجاری‌های زیرسطح ارائه کرد. در نتیجه ترکیب روش‌هایی ژئوفیزیکی از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی به سه صورت کلی انجام می‌شوند: (۱) تفسیر توأمان^۲ [۷، ۸، ۲) معکوس‌سازی مشارکتی^۳ [۹، ۱۰] و (۳) معکوس‌سازی توأمان^۴ که به دو صورت معکوس‌سازی توأمان بر پایه خواص پتروفیزیکی [۱۱] و معکوس‌سازی توأمان بر پایه شباهت‌های ساختاری [۱، ۱۲-۱۵] انجام می‌شود.

در تفسیر توأمان، مدل معکوس‌سازی داده‌های هر روش به‌طور جداگانه به دست می‌آیند و سپس بر اساس مدل‌های معکوس‌سازی، اطلاعات زمین‌شناسی و اطلاعات اولیه موجود مدل نهایی برای زیر سطح ارائه می‌شود (شکل ۱). مهم‌ترین مشکل روش تفسیر توأمان آن است که مدل نهایی ارائه‌شده توسط ژئوفیزیکدان مختلف لزوماً یکسان نیست؛ اما باید توجه

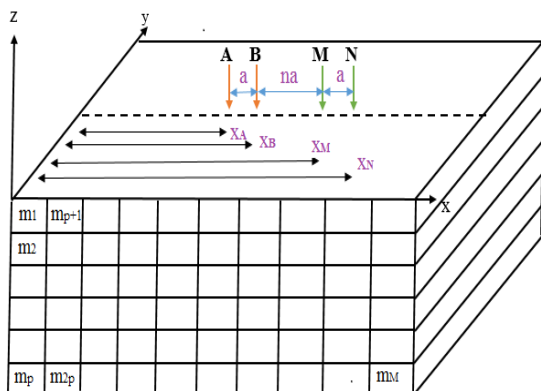
که

$$I_{AM} = \begin{cases} \frac{4(c^2 + p^2)E(q) - 8p^2K(q)}{cp^2(c^2 - p^2)^2} \left(\frac{x_{st} - Z'^2}{+c^2} \right) - \frac{4U}{c^3q} & \text{for } c > p, q = \sqrt{\frac{c^2 - p^2}{c^2}} \\ \frac{4(c^2 + p^2)E(q) - 8c^2K(q)}{pc^2(p^2 - c^2)^2} \left(\frac{x_{st} - Z'^2}{+p^2} \right) - \frac{4U}{p^3c} & \text{for } p > c, q = p \sqrt{\frac{p^2 - c^2}{p^2}} \\ \frac{\pi}{4} \left[\frac{1}{c^3} - \frac{1}{c^5} (x_{st} - Z'^2) \right] & \text{for } c = p \end{cases} \quad (۶)$$

و

$$\begin{aligned} c^2 &= (x' - x_s) + Z'^2 \\ p^2 &= (x - x') + Z'^2 \\ x_{st} &= (x' - x_s)(x - x') \\ U &= \frac{E(q)}{q(1 - q^2)} - \frac{E(q)}{q} \end{aligned} \quad (۷)$$

x و x_s به ترتیب مختصات x الکترودهای جریان و پتانسیل هستند. x' و Z' مختصات مراکز سلول را نشان می‌دهند و $K(q)$ و $E(q)$ به‌نوبه خود انتگرال کامل بیضوی نوع اول و دوم هستند. رابطه (۴) مسئله پیشرو روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: گسسته سازی زیر سطح به تعداد زیادی منشور با طول بی‌نهایت، آرایش نشان داده‌شده، دوقطبی - دوقطبی است.

۲-۲- مدل سازی پیشرو روش الکترومغناطیسی با عدد القای پایین

برای مدل سازی داده‌های الکترومغناطیسی با عدد القای پایین از روش ارائه‌شده توسط پرز-فلورس و همکاران [۱۸]

توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی غیرخطی است. پرز فلورس و همکاران [۱۸] بین لگاریتم در مبنای ۱۰ مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری و مقاومت‌ویژه الکتریکی واقعی رابطه خطی را ایجاد کردند که رابطه آن در حالت سه‌بعدی به‌صورت زیر است [۱۸]:

$$\log \rho_a(r_A, r_B, r_M, r_N) = \frac{C}{4\pi^2} \times \int M(r_A, r_B, r_M, r_N, r') \times \log \rho_a(r') d^3 r' \quad (۱)$$

که در آن C فاکتور هندسی آرایه مورد استفاده است. پارامترهای r_A, r_B, r_M, r_N و r' به ترتیب بردارهای مکان الکترودهای A, B, C, D و بی‌هنجاری را مشخص می‌کنند. M نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸]:

$$\begin{aligned} M(r_A, r_B, r_M, r_N, r') &= L(r_A, r_M, r') \\ &- L(r_A, r_N, r') \\ &- L(r_B, r_M, r') \\ &+ L(r_B, r_N, r') \end{aligned} \quad (۲)$$

$$L(r_i, r_j, r') = \frac{(r' - r_i)(r_j - r')}{|r' - r_i|^3 |r_j - r'|^3} \quad i = A, B \quad \text{and} \quad j = M, N$$

درواقع رابطه (۱) یک معادله انتگرال فرد-هولم^۸ نوع اول است که با انتگرال گیری از آن در جهت y از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت، به حالت دوبعدی تبدیل می‌شود:

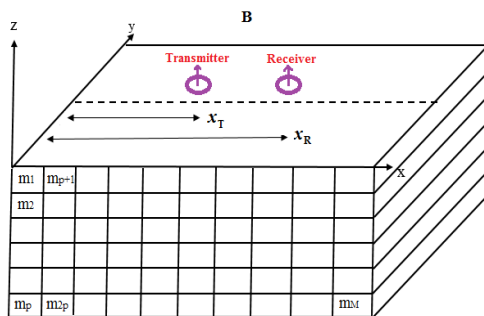
$$d(s) = \int G(s, x, z) m(x, z) dx dz \quad (۳)$$

s مشخص‌کننده مکان الکترودهای جریان و پتانسیل است، d پاسخ پیشرو، (x, z) مختصات نقاط ناحیه موردنظر، G کرنل و m مدل موردنظر است. در این حالت، زیر سطح به $n_x \times n_z$ سلول تقسیم می‌شود (شکل ۲) و رابطه (۳) را می‌توان به‌صورت معادله ماتریسی زیر نوشت:

$$d_R = A_R m_R \quad (۴)$$

d_R و m_R به ترتیب بردار داده‌های اندازه‌گیری شده (مقاومت ویژه‌های الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده) و بردار پارامترهای مدل (توزیع مقاومت‌ویژه الکتریکی زیر سطح) هستند. A_R ماتریس عملگر پیشرو است که به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود [۱۶، ۱۸]:

$$A = \frac{n(n+1)(n+2)}{4\pi} (I_{AM} - I_{AN} - I_{BM} + I_{AN}) \quad (۵)$$



شکل ۳: گسسته سازی زیر سطح به تعداد زیادی منشور.

آرایش نشان داده شده، دوقطبی مغناطیسی قائم است.

۳-۲- الگوریتم معکوس سازی میرا وزن دهی شده کمینه طول^{۱۲}

مسئله معکوس سازی داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و الکترومغناطیسی از نوع فرومغین و بد شرط^{۱۳} است و بنابراین نیاز به منظم سازی دارد. متداول ترین روش برای منظم سازی، منظم سازی تیخونوف^{۱۴} است. از آنجا که معکوس سازی داده‌های هر دو روش از نوع خطی است، بنابراین تابع هدف زیر به کار گرفته می‌شود [۲۱]:

$$\min \rightarrow \|W_d(Am - d)\|_2^2 + \alpha \|W_m(m - m_r)\|_2^2 \quad (11)$$

جمله اول بیانگر عدم برازش داده‌ها است و جمله دوم تابع هدف مدل نامیده می‌شود. W_m و W_d به ترتیب ماتریس‌های وزن دهی داده‌ها و مدل هستند؛ پارامتر α منظم سازی و m_r نیز مدل اولیه است. کمینه سازی تابع هدف بالا در فضای داده منجر به جواب کمینه طول میرا وزن دهی شده زیر می‌شود. کارآمدی این الگوریتم برای داده‌های الکترومغناطیس با عدد القای پایین و روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نشان داده شده است (برای مثال، پرنو و همکاران [۲۲]؛ ورفی نژاد و همکاران [۱۶]):

$$m = m_r + (W_m^{-1}A^T)(AW_m^{-1}A^T + \alpha I)^{-1}(d - Am_r) \quad (12)$$

$$\Rightarrow W_m = \frac{1}{(Z)(\beta)}$$

در رابطه (۹)، تابع وزن دهی عمقی [۲۳] به عنوان تابع وزن دهی مدل در نظر گرفته شده است.

۲-۴- زمین شناسی ناحیه مورد مطالعه و برداشت داده‌ها

سوپر گروهِ کارو^{۱۵} معروف ترین واحد چینه شناسی موجود در آفریقای جنوبی است که از توالی ضخیم لایه‌های غالباً

استفاده شد. درواقع مانند روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی با بهره گیری از تقریب بورن^۹ یک رابطه خطی بین مقادیر رسانندگی ظاهری اندازه گیری شده (داده‌ها) و توزیع رسانندگی زیر سطح (مدل) ایجاد کردند. این رابطه انتگرالی برای دو آرایش بسیار رایج دوقطبی‌های مغناطیسی قائم (VD)^{۱۰} و دوقطبی‌های مغناطیسی افقی (HD)^{۱۱} به صورت زیر است [۴]:

$$\sigma_{a,z}(r_1, r_2) = -\frac{16\pi s}{\omega\mu_0 m_z} \iint_v G_{Hz}(r, r_2). \quad (8)$$

$$E_{Hz}(r, r_1)\sigma(r)d^3r$$

$$\sigma_{a,z}(r_1, r_2) = -\frac{16\pi s}{\omega\mu_0 m_y} \iint_v G_{Hy}(r, r_2). \quad (9)$$

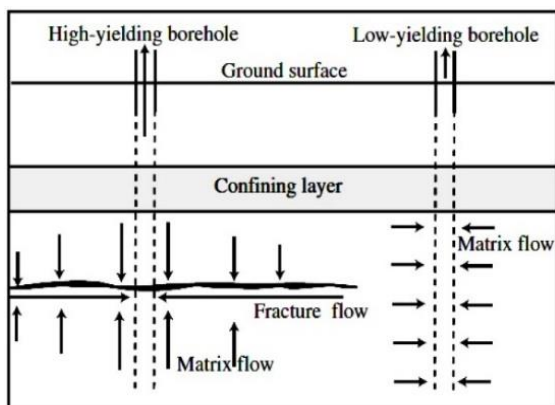
$$E_{Hy}(r, r_1)\sigma(r)d^3r$$

σ_a و σ به ترتیب رسانندگی ظاهری اندازه گیری شده و توزیع رسانندگی زیر سطح هستند، μ_0 تروایی مغناطیسی خلأ، s فاصله فرستنده تا گیرنده، r بردار مکان بی‌هنجاری و r_1 و r_2 به ترتیب بردار مکان فرستنده و گیرنده می‌باشند. روابط مربوط به G_{Hy} ، E_{Hz} ، G_{Hz} و E_{Hy} در مقاله پرز-فلورس و همکاران [۴] ارائه شده است. درواقع مسئله مدل سازی داده‌های الکترومغناطیسی یک انتگرال فرد-هولم نوع اول به صورت رابطه (۳) است که با انتگرال گیری از آن در جهت y از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت، معادلات دوبعدی حاصل می‌شوند. با گسسته سازی زیر سطح (شکل ۳) به تعداد زیادی سلول، رابطه ماتریسی زیر حاصل می‌شود:

$$d_E = A_E m_E \quad (10)$$

d_E و m_E به ترتیب بردار رسانندگی‌های ظاهری اندازه گیری شده و بردار توزیع رسانندگی زیر سطح در حالت گسسته هستند. برای جزئیات بیشتر تولید ماتریس عملگر پیشرو A_E به مقاله قاری و ورفی نژاد [۱۹] رجوع شود.

را نشان می‌دهند (شکل ۴) که عبارت‌اند از: جریان ماتریسی و جریان شکستگی [۲۶].



شکل ۴: جریان ناشی از شکستگی و ماتریس در سوپرگروه کارو [۲۶].

سایت مورگنزن فارم یکی از مکان‌های موردبررسی در حوضه کارو است که موردتوجه آب‌زمین‌شناسان قرار گرفته است. در این سایت نیز توده‌های نفوذی دولریتی نسبت به واحدهای رسوبی احاطه‌کننده مقاومت ویژه الکتریکی بیشتری دارند، بنابراین روش‌های EM-LIN و ERT در آشکارسازی این توده‌ها به کار گرفته شده‌اند. داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی با آرایش الکترودی و نر-شلومبرگر با فواصل بین الکترودی (الکترودهای پتانسیل) ۵ و ۱۰ متر برداشت شده است. طول پروفیل ۴۰۰ متر و تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده ۱۲۰۰ است. برداشت داده‌های الکترومغناطیسی با عدد القای پایین با دو آرایش دوقطبی افقی و قائم صورت گرفته است. فاصله فرستنده تا گیرنده برابر ۲۰ متر و تعداد داده‌ها برای هر آرایش برابر ۴۰ است [۲۶].

همچنین فاصله بین نقاط داده‌برداری ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. این داده‌ها در منطقه مورگنزن فارم در کشور آفریقای جنوبی برداشت شده است. شکل ۵-الف موقعیت منطقه مورد برداشت را بر روی نقشه زمین‌شناسی حوضه کارو نشان می‌دهد [۲۵]. همچنین محل تقریبی توده‌های نفوذی دولریتی که حاصل از مطالعات زمین‌شناسی است و "خط دولریتی [۲۷]" نامیده می‌شود و خط برداشت داده‌های ژئوفیزیکی در شکل ۵-ب قابل مشاهده است [۲۵].

رسوبی در طی بازه زمانی ۳۱۰ تا ۱۸۳ میلیون سال پیش تشکیل شده است [۲۳]. از نظر چینه‌شناسی سوپرگروه کارو طبق تغییرات تکتونیکی و شرایط آب و هوایی به چند گروه تقسیم می‌شود [۲۴]: گروه دویکا^{۱۶} از نهشته‌های یخچالی به وجود آمده است، گروه اکا^{۱۷} که از نهشته‌های دریایی تشکیل شده است، گروه بیوفرت^{۱۸} که از نهشته‌های رودخانه‌ها شکل گرفته است و گروه استورمبرگ^{۱۹} که نهشته‌های حمل شده توسط باد آن را به وجود آورده‌اند [۲۳].

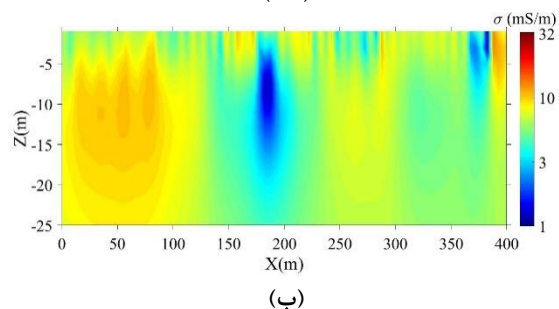
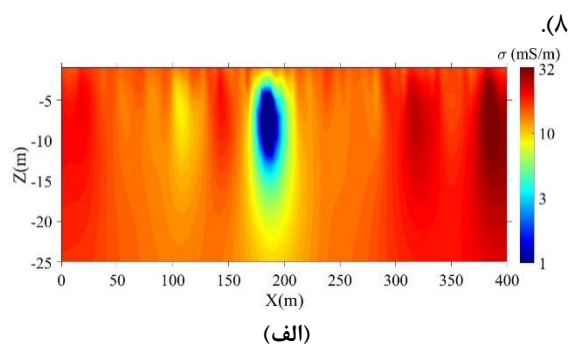
گروه دراکنسبرگ^{۲۰} جوان‌ترین واحد چینه‌شناسی در سوپرگروه کارو که از خروج گدازه‌های بازالتی تشکیل شده است. ماسه‌سنگ‌های نسبتاً غیرکشسان‌تر در سازندهای کارو نسبت به لایه‌های الاستیک‌تر لای سنگ^{۲۱} و گل‌سنگ^{۲۲} احتمال شکستگی بیشتری دارند. صفحات تماس بین لایه‌های مختلف سنگ‌های کارو نیز محل مناسبی برای ایجاد شکستگی‌ها هستند [۲۵].

بیشتر شکستگی‌های سنگ‌های کارو به دلیل آتش‌فشان‌های گسترده در دوران ژوراسیک ایجاد شده است [۲۵]. جدای از خروج گدازه‌های دراکنسبرگ، نفوذ کوژسنگ^{۲۳}، آذرین‌لایه‌ها^{۲۴} و دایک‌های دولریتی تا حد زیادی در به وجود آمدن شکستگی سازندهای سنگ‌های رسوبی نقش داشته‌اند [۲۵].

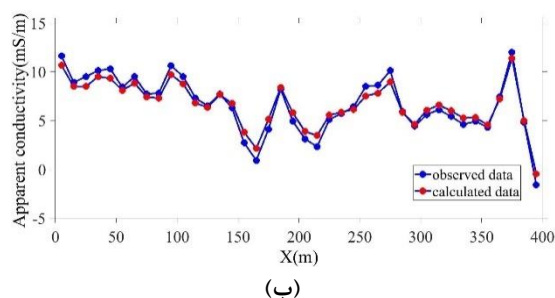
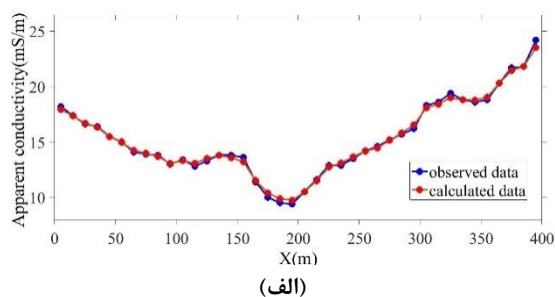
دایک‌ها و آذرین‌لایه‌های دولریتی اغلب هدف اصلی برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در ناحیه کارو هستند [۲۵]. نفوذ ساختارهایی از جنس دولریت درون سنگ‌های رسوبی در سوپرگروه کارو در دوران ژوراسیک اتفاق افتاده است. به دلیل دما و فشار بالای حاصل از این توده‌های نفوذی، سنگ‌های میزبان در تماس با آن‌ها دچار دگرسانی شده‌اند. نواحی تماس دگرسان‌شده معمولاً بیشتر از سایر قسمت‌های سنگ میزبان دچار شکستگی و مستعد هوازدگی می‌گردند و رسانایی هیدرولیکی آن‌ها افزایش می‌یابد. مناطق تحت تأثیر دگرسانی اغلب به‌عنوان مسیرهای ترجیحی برای مهاجرت آب‌های زیرزمینی عمل می‌کنند و به اهداف اولویت‌دار به‌منظور اکتشاف آب‌های زیرزمینی تبدیل می‌شوند [۲۶].

ابعاد فیزیکی شکستگی‌ها اجازه نمی‌دهد که مقادیر زیادی آب در خود شکستگی‌ها ذخیره شود [۲۶]؛ بنابراین منبع تغذیه اصلی آب برای یک گمانه که شکستگی را قطع می‌کند، باید ماتریس^{۲۵} سنگ رسوبی باشد که شکستگی را احاطه کرده است [۲۶]. معمولاً گمانه‌هایی که در محل سفره‌های کارو^{۲۶} با شکستگی‌ها تقاطع دارند، دو نوع جریان

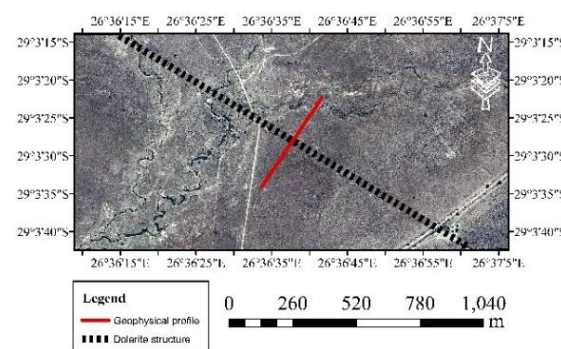
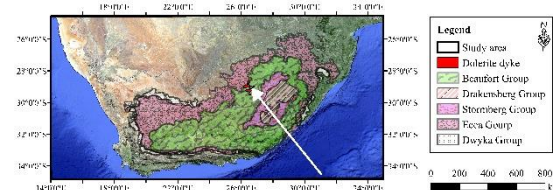
گرفت اما استنباط این موضوع از آرایش دوقطبی قائم دشوار است. لازم به ذکر است که با توجه به برداشت داده‌های الکترومغناطیس با فاصله فرستنده گیرنده ۲۰ متر، امکان بررسی ساختار رسانندگی در عمق‌های بیشتر ممکن نیست؛ اما با توجه به حجم بالای برداشت داده‌های مقاومت ویژه و فواصل بزرگ الکترودها امکان به تصویر کشیدن ساختار مقاومت ویژه تا عمق ۵۰ متر به راحتی امکان پذیر است (شکل



شکل ۸: مقاطع رسانندگی بازیابی شده از معکوس سازی داده‌های EM-LIN برای دو آرایش الف) HD و ب) VD.



شکل ۹: داده‌های محاسبه شده نسبت به داده‌های اندازه گیری شده برای دو آرایش الف) HD و ب) VD.



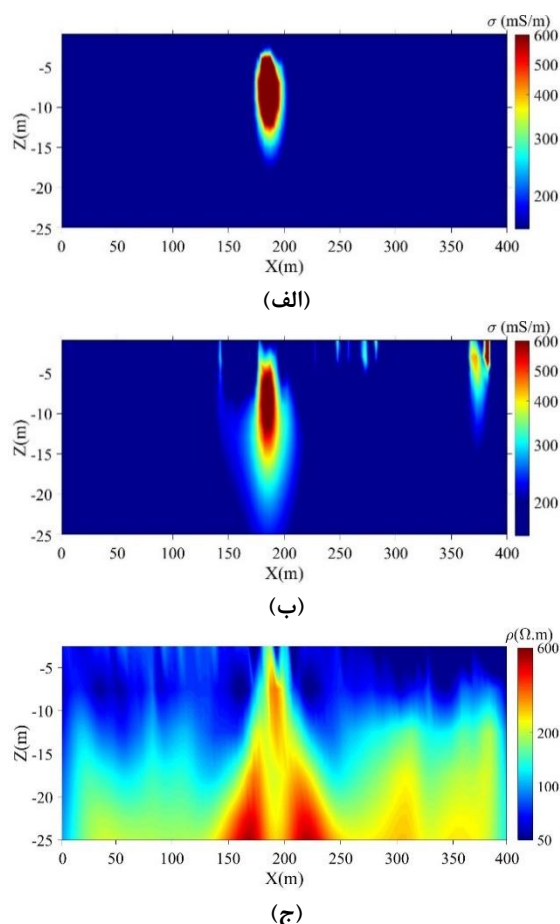
شکل ۵: الف) نقشه زمین شناسی ساده شده حوضه کارو به همراه منطقه برداشت مورگزن فارم [۲۵]، ب) تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه به همراه خط دولریتی و خط برداشت داده های ژئوفیزیکی [۲۷].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج معکوس سازی

با استفاده از الگوریتم ارائه شده، نتایج معکوس سازی داده‌های الکترومغناطیس با عدد القای پایین برای دو آرایش دوقطبی قائم (VD) و افقی (HD) در شکل ۶ نشان داده شده است. این دو مدل دارای انطباق بسیار خوبی باهم هستند. مدل‌های رسانندگی نشان دهنده دایکی در گستره افقی ۱۸۵ تا ۲۰۰ متر می باشند. همچنین گستره عمقی دایک از کمتر از ۵ متر تا حدود ۱۵ متر است. البته باید توجه داشت که مقطع آرایش VD تا حدودی دارای نوفه بیشتر است.

منحنی داده‌های محاسبه شده نسبت به داده‌های اندازه گیری شده برای هر دو آرایش در شکل ۷ به تصویر درآمده است. برازش داده‌های محاسباتی برای آرایش دوقطبی افقی بهتر انجام گرفته است. خطای برازش داده‌های محاسباتی برای آرایش‌های HD و VD به ترتیب ۲/۳۴ و ۴/۴ درصد هستند. از داده‌های برداشت شده با آرایش دوقطبی افقی می توان به صورت کیفی حضور یک ناحیه با رسانندگی پایین در فاصله حدوداً ۲۰۰ متری از ابتدای پروفیل را نتیجه



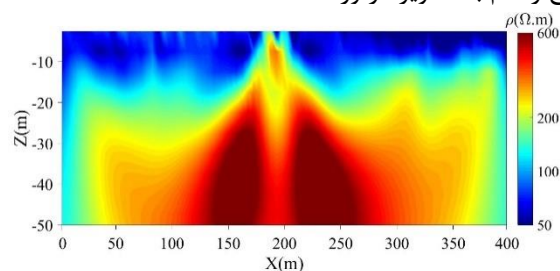
شکل ۱۰: مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی بازسازی شده برای (الف) روش EM-LIN با استفاده از آرایش HD، (ب) روش EM-LIN با استفاده از آرایش VD، و (ج) روش ERT تا عمق حدوداً ۲۵ متری.

در مجموع می‌توان گفت در بررسی این ناحیه، دو روش ERT و EM-LIN به صورت مکمل هم برای درک هرچه بیشتر ساختار زیر سطح عملکرد مطلوبی داشتند.

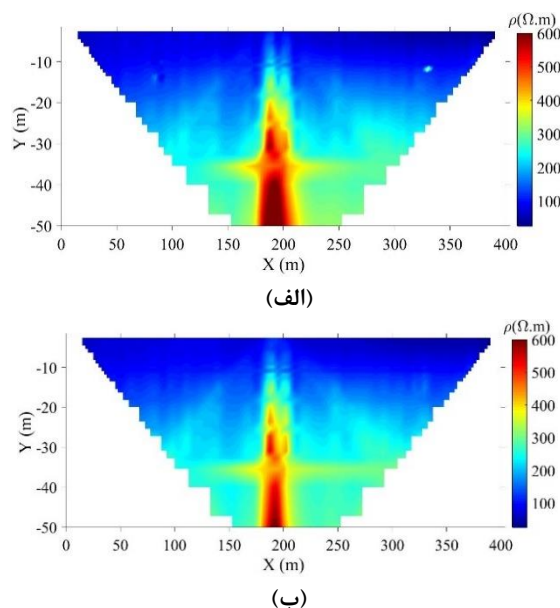
۴- نتیجه‌گیری

معکوس‌سازی داده‌های یک روش ژئوفیزیکی علاوه بر مشکلات ذاتی نظیر عدم یکتایی و ناپایداری، قادر به ارائه اطلاعات کافی از ساختارهای زیرسطحی نیست و لذا ترکیب داده‌های ژئوفیزیکی ضروری است. ترکیب داده‌ها به سه صورت قابل انجام است: تفسیر توأمان، معکوس‌سازی مشارکتی و معکوس‌سازی توأمان. در این مقاله تفسیر توأمان داده‌های روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش الکترومغناطیس با عدد القای پایین برای بررسی ساختار رسانندگی (یا مقاومت‌ویژه الکتریکی) ناحیه‌ای در آفریقای جنوبی به کار گرفته شد. در این ناحیه معمولاً دایک دولریتی هدف اصلی برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی هستند که

مقطع مقاومت ویژه بازایی شده از معکوس‌سازی داده‌ها بیانگر زمینی تقریباً دو لایه‌ای است که لایه نزدیک به سطح رساناتر است. در وسط پروفیل در لایه رسانا، توده مقاومی تا نزدیک سطح امتداد یافته است که نشان از سازگاری نتایج هر دو روش مقاومت ویژه و الکترومغناطیس با عدد القای پایین دارد. شبه مقاطع داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های محاسبه‌شده در شکل ۹ قابل مشاهده است. به منظور مقایسه هر چه بهتر مدل‌های به دست آمده از هر دو روش، مقاطع رسانندگی روش الکترومغناطیس با عدد القای پایین را به مقطع مقاومت ویژه تبدیل می‌کنیم. این موضوع با توجه به اینکه مقاومت ویژه عکس رسانندگی است به راحتی امکان پذیر است. همچنین برای مقایسه هر چه بهتر مقطع معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژه را فقط تا عمق نزدیک به ۲۵ متر نمایش داده می‌شود (شکل ۱۰). مقایسه این مقاطع به وضوح بیانگر قدرت تفکیک بهتر روش EM-LIN در بازسازی دایک است اما روش ERT ساختار لایه‌ای زیر سطح را هم به تصویر درآورده است.



شکل ۸: مقطع مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده از معکوس‌سازی داده‌های ERT



شکل ۹: شبه مقاطع (الف) داده‌های اندازه‌گیری شده و (ب) داده‌های محاسبه‌شده ERT

data at low-induction numbers. *Geophysics* 77(4), WB47-WB57.

[5] Ghari, H. A., Voge, Malte., Bastani, M., Pfaffhuber, A. A., and Oskooi, B. (2020). Comparing resistivity models from 2D and 1D inversion of frequency domain HEM data over rough terrains: cases study from Iran and Norway. *Exploration Geophysics* 51(1), 45-65.

[6] Ghari, H., Oskooi, B., and Bastani (2020). M. Multi-Line 1D Inversion of Frequency-Domain Helicopter-Borne Electromagnetic Data with Weighted 3D Smoothness Regularization: A Case Study from Northern Iran. *Pure and Applied Geophysics* 177, 5299-5323

[7] Milano, M., Varfinezhad, R., Bizhani, H., Moghadasi, M., Kalateh, A. N., and Baghzendani, H. (2021). Joint interpretation of magnetic and gravity data at the Golgozar mine in Iran. *Journal of Applied Geophysics* 195, 104476.

[8] Ghari, H., Varfinezhad, R., and Parnow, S. (2023). 3D joint interpretation of potential field, geology, and well data to evaluate a salt dome in the Qarah- Aghaje area, Zanjan, NW Iran. *Near Surface Geophysics* 21(3), 233-246.

[9] Singh, A., Mishra, P. K., and Sharma, S. P. (2019). 2D cooperative inversion of direct current resistivity and gravity data: A case study of uranium bearing target rock. *Geophysical Prospecting* 67(3), 696-708.

[10] Varfinezhad, R., Parnow, S., Florio, G., Fedi, M., and Mohammadi Vizheh, M. (2023). DC resistivity inversion constrained by magnetic method through sequential inversion. *Acta Geophysica* 71(1), 247-260.

[11] Ghose, R., and Slob, E. C. (2006). Quantitative integration of seismic and GPR reflections to derive unique estimates for water saturation and porosity in subsoil. *Geophysical Research Letters* 33(5).

[12] Haber, E., and Oldenburg, D. (1997). Joint inversion: a structural approach. *Inverse problems* 13(1), 63.

[13] Gallardo, L. A., and Meju, M.A. (2004). Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross gradients constraints. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 109, B03311.

[14] Gallardo, L. A., and Meju, M. A. (2011). Structure- coupled multiphysics imaging in geophysical sciences. *Reviews of Geophysics* 49 (1).

[15] Wang, K.P., Tan, H.D., and Wang, T. (2017). 2D joint inversion of CSAMT and magnetic

فرآیند معکوس‌سازی برای آشکارسازی آن استفاده شد. مبنای مدل‌سازی هر دو روش معادلات انتگرالی بر پایه تقریب بورن است و برای فرآیند معکوس‌سازی از الگوریتم کمینه طول وزن‌دهی شده بهره گرفته شد. نتایج معکوس‌سازی داده‌های الکترومغناطیس با عدد القای پایین برای دو آرایش VD و HD دارای انطباق بسیار خوبی هستند. مدل‌های رسانندگی حاصل نشان‌دهنده دایکی در گستره افقی حدوداً ۱۸۵ تا ۲۰۰ متر می‌باشند. همچنین گستره عمقی دایک از کمتر از ۵ متر تا حدود ۱۵ متر است. مقطع مقاومت ویژه حاصل از معکوس‌سازی داده‌ها نشانگر محیط تقریباً دولایه است که لایه نزدیک به سطح رساناتر است و در وسط آن توده مقاومی تا نزدیک سطح امتداد یافته است که نشان از سازگاری نتایج هر دو روش مقاومت ویژه و الکترومغناطیس با عدد القای پایین دارد. در مجموع باید گفت که روش الکترومغناطیس در بازسازی دایک بسیار بهتر عمل کرده است اما روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی ساختار لایه‌ای را نیز به تصویر درآورده است.

سپاسگزاری

نویسنده بر خود لازم می‌داند مراتب تشکر صمیمانه خود را از خانم مهندس داکالو ماکوکا از دانشگاه ایالت آزاد (دانشگاه فری استیت University of the Free State) (آفریقای جنوبی) به خاطر دسترسی به مجموعه داده‌های مختلف مورد استفاده در این مطالعه و نیز نظرات ارزشمند داوران و دبیر تخصصی محترم که باعث ارتقای کیفی این مقاله شدند، اعلام کند.

مراجع

[1] Varfinezhad, R., Oskooi, B., and Fedi, M. (2020). Joint inversion of DC resistivity and magnetic data, constrained by cross gradients, compactness and depth weighting. *Pure and Applied Geophysics* 177, 4325-4343.

[2] Loke, M. H., and Barker, R. D. (1996). Rapid least- squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections by a quasi- Newton method. *Geophysical prospecting* 44(1), 131-152.

[3] Cella, F. and Fedi, M. (2012). Inversion of potential field data using the structural index as weighting function rate decay. *Geophysical Prospecting* 60 (2), 313-336.

[4] Pérez-Flores, M. A., Antonio-Carpio, R. G., Gómez-Treviño, E., Ferguson, I., and Méndez-Delgado, S. (2012). Imaging of 3D electromagnetic

- [21] Tikhonov, A. N. and Arsenin, V. Y. (1977). Solutions of ill-posed problems, New York 1(30), 487.
- [22] Li, Y., and Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics* 61(2), 394-408.
- [23] Rubidge, T. M., 2005. The story of earth and life. 1st ed ed. Cape Town: struik Nature.
- [24] Geel, C., 2014. Brief geologic overview of the Cape Fold Belt and Karoo Basin: Field excursion to Matjiesfontein, 10th Inkaba yeAfrica conference. Matjiesfontein, Inkba yeAfrica.
- [25] Makhokha, D., & Fourie, F. (2016). A systematic approach to the interpretation of conductivity anomalies across intrusive dolerite dykes and sills in the Karoo Supergroup (Doctoral dissertation, MSc thesis. University of the Free State, Bloemfontein).
- [26] Fourie, F. D. (2003). Application of electroseismic techniques to geohydrological investigations in Karoo Rocks (Doctoral dissertation, University of the Free State).
- [27] Veevers, J.J. & Powell, C.M. eds. (1994). Permian-Triassic Pangean basins and foldbelts along the Panthalassan margin of Gondwanaland 184. Geological Society of America.
- data based on cross-gradient theory. *Applied Geophysics* 14(2), 279-290.
- [16] Varfinezhad, R., Ghari, H., and Rafiei, R. (2022). Topography incorporated inversion of DC resistivity data using integral equation vs. Res2dinv software. *Bulletin of Geophysics and Oceanography* 63(3), 427-442.
- [17] Méndez-Delgado, S., Gómez-Treviño, E., Pérez-Flores, M. A. (1999). Forward modelling of direct current and low-frequency electromagnetic fields using integral equations. *Geophysical Journal International* 137 (2), 336–352.
- [18] Perez-Flores, M.A., Méndez-Delgado S. and Gomez-Treviño, E. (2001). Imaging low frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics* 66 (4), 1067–1081.
- [19] Ghari, H., and Varfinezhad, R. (2022). 2D Linear inversion of ground-based controlled-source electromagnetic data under a low induction number condition. *Journal of the Earth and Space Physics* 48(3), 557-573 (In Persian).
- [20] Parnow, S., Oskooi, B., Florio, G. (2021). Improved linear inversion of low induction number electromagnetic data. *Geophysical Journal International* 224(3), 1505–1522.

¹⁴ Tikhonov Regularization¹⁵ Karoo Supergroup¹⁶ Dwyka¹⁷ Eccu¹⁸ Beaufort¹⁹ Stormberg²⁰ Drakensberg²¹ Siltstone²² Mudstone²³ Laccolith²⁴ Sill²⁵ Matrix²⁶ Karoo¹ Electrical resistivity tomography² Joint Interpretation³ Cooperative Inversion⁴ Joint Inversion⁵ Electromagnetic Low Induction Number⁶ Morgenzon Farm⁷ Pérez-Flores⁸ Fredholm Integral Equation⁹ Born approximation¹⁰ Vertical Dipole¹¹ Horizontal Dipole¹² Damped Weighted Minimum Length Solution Algorithm¹³ Ill-Posed