

تصویرسازی کانسار آهن اجت آباد با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی

محمد رضایی^۱، علی مرادزاده^۲، حمید آقاجانی^{۳*} و علی نجاتی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

آستاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

آستاد همکار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

آستادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۳۰، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۰۴)

چکیده

کانسار آهن اجت‌آباد در شمال شرق شهر سمنان واقع شده است. در این محدوده بیشتر کانی‌سازی آهن از نوع هماتیتی و بعد مگنتیتی است. به منظور شناسایی وضعیت عمقی و گسترش جانبی کانسار از روش مغناطیس‌سنجی استفاده شد. پس از برداشت داده‌ها و انجام تصحیحات لازم بر روی این داده‌ها و اعمال صافی برگردان به قطب چندین بی‌هنجاری در محدوده شناسایی شد. نتایج نشان می‌دهد که هشت بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی در این منطقه وجود دارد. با انجام صافی گسترش به سمت بالا و مدل‌سازی وارون سه‌بُعدی داده‌های مغناطیسی، گسترش جانبی و عمقی توده‌های بی‌هنجاری تصویرسازی گردید. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که از بین این هشت توده، تعداد هفت عدد آنها با کانی‌سازی همراه بوده و تنها یک توده بی‌هنجاری موجود به احتمال زیاد توده نفوذی است. همچنین مدل‌سازی نشان داد که عمق کانی‌سازی بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر است.

واژه‌های کلیدی: کانسار آهن، اجت‌آباد، داده‌های مغناطیس، برگردان به قطب، ادامه فراسو، وارون‌سازی

۱ مقدمه

بررسی‌ها و مشاهدات صحرائی نشان می‌دهد که در این منطقه و به ویژه بر روی این کانسار سابقه معدن‌کاری قدیمی با بیش از ۵۰ سال وجود دارد. این آثار به صورت محدود در دو محل همراه با مقداری دپوی معدنی از کانسنگ آهن استخراج شده و اقدامات اولیه برای ریل-کشی برای دسترسی به محل و سکوی بارگیری دیده می‌شود. برای اولین بار بلیچ و براگین (۱۹۹۳) کانسارهای آهن منطقه سمنان را با ژنز کانسارهای گرمابی معرفی کردند، ولی مطالعات زمین‌شناختی بعدی نشان می‌دهد

در منطقه جام که در شمال شرق شهر سمنان و جنوب جاده ترانزیتی تهران-مشهد واقع شده تعدادی اندیس، کانسار و معدن آهن وجود دارد. برخی از معادن این منطقه مثل معدن همیرد به علت ترکیب هماتیتی برای مصارف موردنیاز کارخانه‌های سیمان استفاده می‌شود. از جمله کانسارهای منطقه، کانسار اجت‌آباد است که جهت اکتشاف و شناسایی بیشتر آن، مطالعات مغناطیس‌سنجی در این محدوده انجام شده است (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵).

میدان به سمت بالا یا ادامه فراسو بر داده‌ها استفاده گردید. در نهایت شکل و گسترش عمقی این توده‌ها با استفاده از روش وارون‌سازی سه‌بعدی تعیین خواهد شد.

۲ زمین‌شناسی منطقه

کانسار آهن اجت‌آباد در ۶۳ کیلومتری شمال شرق شهر سمنان، جنوب شرق روستای اجت‌آباد و بین طول جغرافیایی $33^{\circ}48'23''$ تا $33^{\circ}48'46''$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ}42'44''$ تا $35^{\circ}43'1''$ شمالی و در بخش جنوبی جاده سمنان-دامغان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه داخل نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ جام بوده و محدوده‌ای به وسعت ۳۶ هکتار را شامل می‌شود (شکل ۱). از منظر سنگ‌شناسی محدوده کانی‌سازی شده درون ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آهکی دونین تشکیل شده و در اطراف آن سنگ‌های سازند کرج شامل توف و آندزیت و سایر سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی‌های وابسته به ائوسن رخمون دارند. علاوه بر آن در بخش‌های غربی و جنوبی محدوده مورد بررسی، واحدهای سنگی کنگلومرا و سنگ آهک کنگلومرای سازند فجن به سن ائوسن زیرین دیده می‌شوند.

با توجه به مطالعات صحرایی و پتروگرافی سنگ‌ها می‌توان گفت که عمده کانی‌سازی آهن در این منطقه از جنس هماتیت و مگنتیت بوده که احتمالاً در اثر فعالیت‌های گرمابی ناشی از نفوذ سنگ‌های آندزیت-داسیت به داخل رسوبات آهکی و کنگلومرای و همچنین سیلیس-های ائوسن شکل گرفته باشد (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵). پدیده جالب توجه کانی‌سازی در این منطقه وجود گرهک‌های جدا یا متصل به هم کانسنگ آهن در زون خردشده هماتیت می‌باشد که در قسمت جنوبی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد شکل این گرهک‌ها کروی تا نیمه‌کروی در حد ماسه تا گرانول و از جنس هماتیت بوده که به‌وسیله سیمان اسپاریتی به هم

که این کانسارها مرتبط با فعالیت ماگمایی در محدوده زمانی الیگومیوسن است (قربانی، ۱۳۸۱).

غالب کانسارهای آهن این منطقه به دلیل دارا بودن درصد قابل توجهی کانی مگنتیت مغناطیسی بوده و به این دلیل از روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف آن می‌توان بهره گرفت. روش برداشت داده‌های مغناطیسی بسته به وسعت منطقه و دقت مورد نیاز به دو صورت هوایی و یا زمینی قابل انجام است. در این روش هنگامی که شدت میدان مغناطیسی زمین به‌وسیله مغناطیس‌سنج‌های حساس با دقت بیش از یک نانوتسلا برداشت شوند، یک‌سری تصحیحات ضروری روی داده انجام شده و سپس نتایج به‌صورت نقشه شدت میدان مغناطیسی کل ارائه می‌شود (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۱). برای اینکه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر روی عامل مولد آن قرار گیرد، صافی برگردان به قطب بر روی داده‌ها اعمال می‌شود (بارانوف و ناد، ۱۹۶۴). با استفاده از اعمال صافی ادامه فراسو بر داده‌ها می‌توان تخمینی از عمق توده مولد بی‌هنجاری به-دست آورد (جاکوبسون، ۱۹۸۷؛ گانیو و همکاران، ۲۰۱۳).

با وارون‌سازی داده‌های مغناطیس می‌توان مدل سه-بعدی از توزیع مغناطیس‌پذیری سنگ‌های در زیر سطح زمین ارائه کرد. این مدل‌ها با استفاده از اطلاعات موجود درباره محیط و واحدهای سنگی محل در تفسیر زمین-شناختی و ساختاری منطقه مورد مطالعه به کار می‌روند. به‌این ترتیب می‌توان شکل، عمق و گسترش عمقی ماده معدنی را مشخص کرد (لی و لی، ۲۰۱۲؛ کردانی، ۲۰۱۳؛ کارلوس و همکاران، ۲۰۱۴).

در این مقاله ابتدا تصحیحات لازم بر روی داده‌های مغناطیس برداشتی انجام و سپس صافی برگردان به قطب بر روی داده‌ها اعمال می‌شود تا بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر روی محل واقعی خود قرار گیرند. برای برآورد و تخمین عمق توده‌های بی‌هنجار محدوده از صافی گسترش

متصل شده و گرهک‌های بزرگ‌تر را به وجود آورده‌اند (عابدی و همکاران، ۱۳۸۷).

منظور پردازش داده‌ها از نسخه ۶/۴ نرم‌افزار Oasis Montaj شرکت ژئوسافت استفاده شده است.

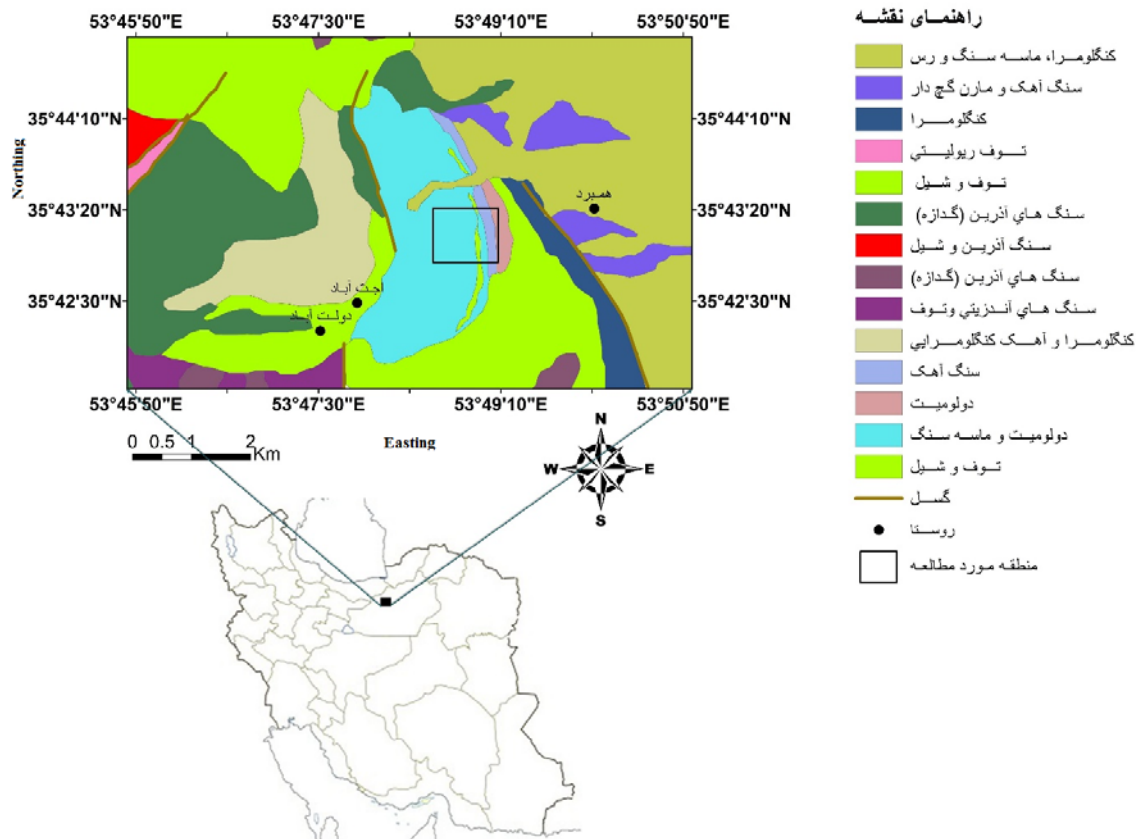
۳ داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق بر روی ۲۳ پروفیل شرقی-غربی و سه پروفیل شمالی-جنوبی بر روی ۱۲۰۰ نقطه ایستگاهی در یک شبکه با ابعاد تقریبی ۲۰×۱۵ متر (شکل ۲) در شرایط آرام مغناطیسی با استفاده از مگنتومتر پروتون برداشت شده‌اند (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۵). پس از تصحیح تغییرات روزانه روی داده‌های مورد نظر اثر میدان مغناطیسی زمین (IGRF) از داده‌ها با لحاظ مقدار زاویه انحراف و میل مغناطیسی محدوده حذف شد. به-

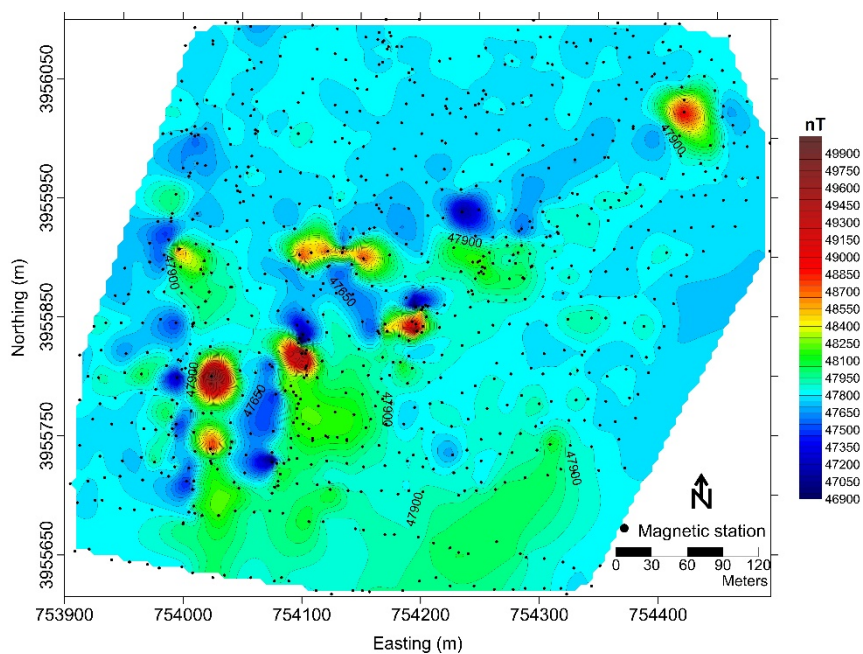
۴ روش کار

۴-۱ بررسی کیفی داده‌ها

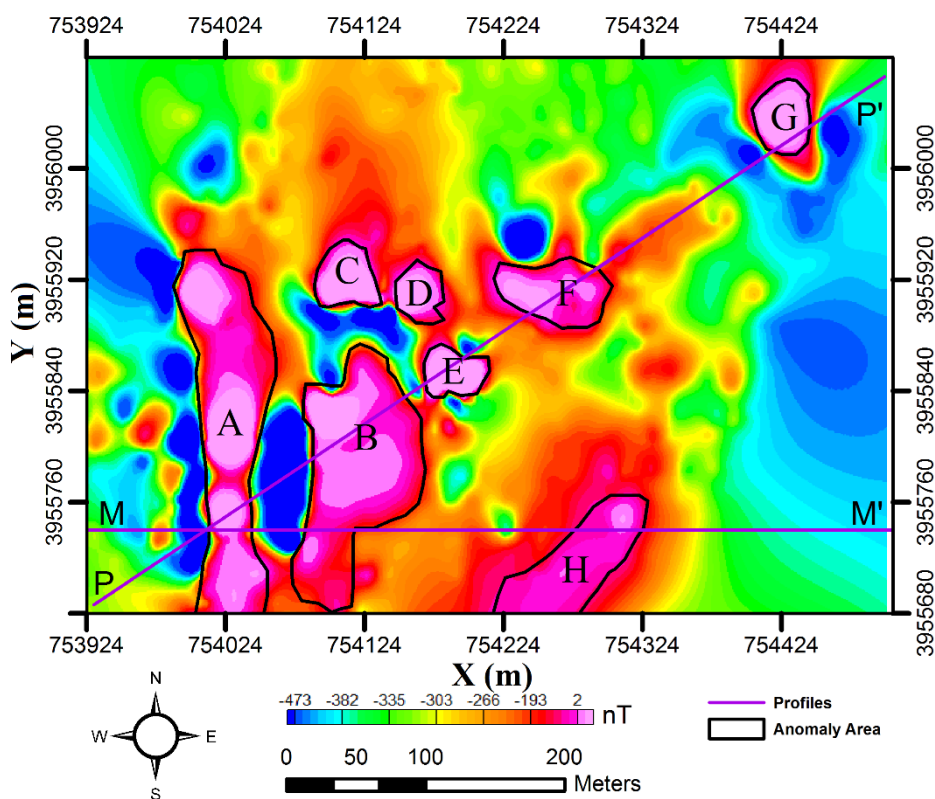
با توجه به میزان انحراف مغناطیسی و زاویه میل آن و به منظور قرارداد محل بی‌هنجاری ایجاد شده روی نقشه میدان کل از صافی برگردان به قطب (RTP) استفاده شد تا بی‌هنجاری‌های مغناطیسی حاصل بر روی توده‌های مولد خود قرار گیرند. به این منظور، براساس موقعیت جغرافیایی محدوده مورد بررسی و با لحاظ مقادیر زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی به ترتیب ۵۳ و ۳/۶ درجه، صافی برگردان به قطب اعمال شد (شکل ۳).



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه میدان مغناطیسی کل منطقه مورد مطالعه همراه با موقعیت ایستگاه‌های برداشت.



شکل ۳. نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی، انواع بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشخص شده است.

تمامی نقشه‌های تهیه شده با این صافی، روند اصلی کانی‌سازی موجود در منطقه را تأیید می‌کنند. مطابق این شکل در نقشه به دست آمده از اعمال صافی ادامه فراسو با ارتفاع ۱۵ متر، بی‌هنجاری‌ها و نوفه‌های سطحی حذف شده و بی‌هنجاری‌های اصلی بهتر آشکار شده‌اند. نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۶۰ متری نشان می‌دهد که به ظاهر توده‌های بی‌هنجار F, G گسترش عمقی کمتری نسبت به سایر توده‌های بی‌هنجار دارند، هرچند که گسترش عمقی توده F از G بیشتر است.

همچنین به نظر می‌رسد بی‌هنجاری H منشأ متفاوتی از سایر بی‌هنجاری‌ها دارد. با افزایش ارتفاع گسترش به ۱۰۰ متر، تنها اثر بی‌هنجاری‌های H, B در نقشه دیده می‌شود، که نشان‌دهنده گسترش عمقی بیشتر این دو توده بی‌هنجار نسبت به سایر بی‌هنجاری‌ها است. این موضوع نشان می‌دهد که عمده توده‌های معدنی دارای گسترش عمقی کمتر از ۱۰۰ متر می‌باشند. با ادامه فراسو با ارتفاع بالاتر اثر توده‌های معدنی کم عمق‌تر از روی این نقشه‌ها محو شده و منحنی‌های تراز مغناطیسی هموارتر شده‌اند، به طوری که با ارتفاع گسترش حدود ۱۳۰ متر دیگر آثاری از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دیده نمی‌شود، بلکه تنها اثرات مربوط به نفوذی‌های آذرین عمیق با خطوط تراز تقریباً خطی قابل پی‌گیری می‌باشند. بنابراین براساس مشاهدات صحرائی و گزارش‌های موجود و همچنین اعمال روش ادامه فراسو روی داده‌های مغناطیسی، تصور می‌رود که توده‌های آهن کانسار اجت‌آباد بیشتر در عمق کم واقع شده و احتمالاً اثر آنها در عمق تقریبی بیش از ۱۳۰ متر محو گردد.

۴-۲ وارون‌سازی داده‌ها

مدل‌سازی وارون سه‌بعدی فرآیندی است که در آن می‌توان به کمک داده‌های مشاهده‌ای، مدل توزیع سه‌بعدی تغییرات خاصیت فیزیکی در زیر سطح زمین را به دست

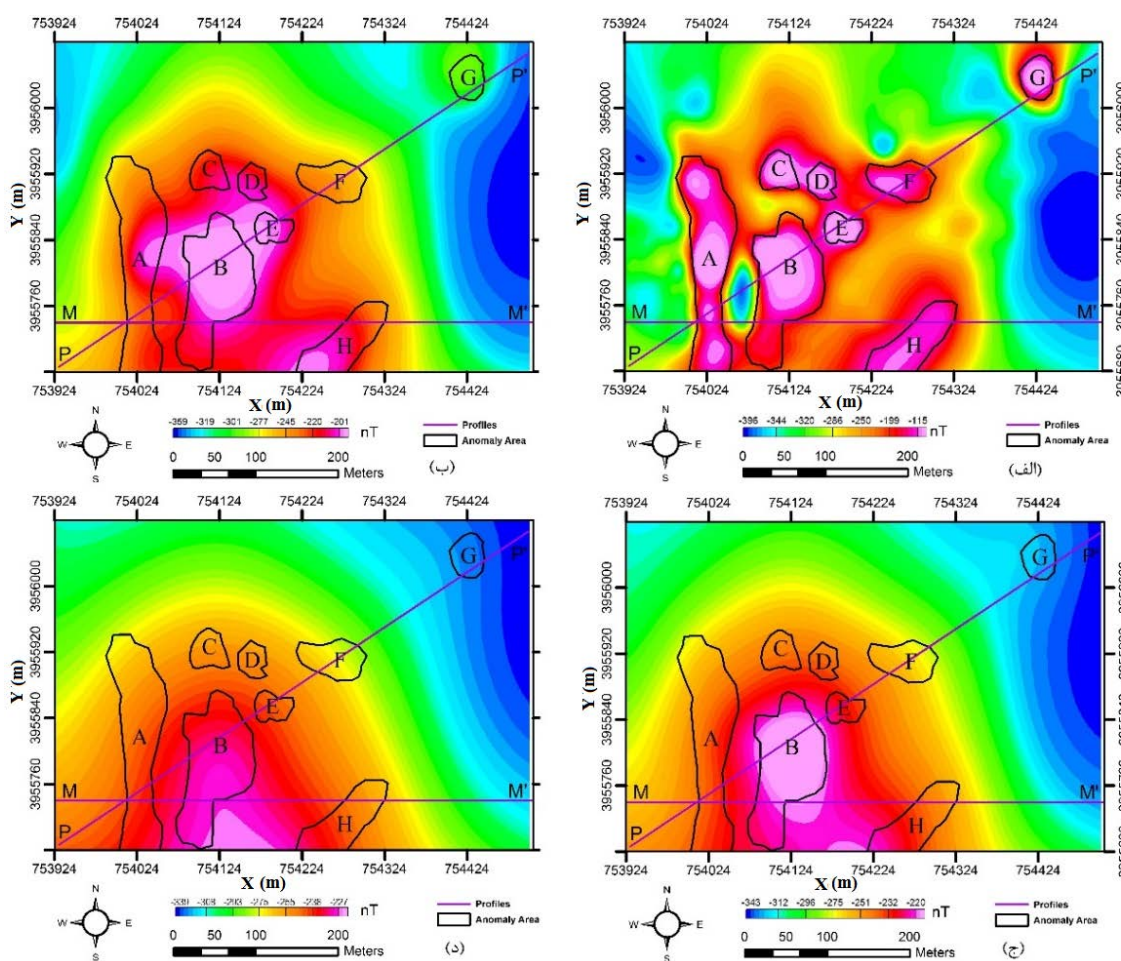
با توجه به نقشه برگردان به قطب حاصل (شکل ۲)، در این منطقه هشت بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی دیده می‌شود که برای سهولت ارجاع با حروف A, B, C, D, E, F, G, H نام‌گذاری شدند. در بین این بی‌هنجاری‌ها A, B, H گسترش سطحی بیشتری نسبت به سایر بی‌هنجاری‌ها دارند که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر این سه توده می‌باشد. اما شدت بی‌هنجاری H نسبت به سایر بی‌هنجاری‌ها کمتر است. روند بیشتر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در این منطقه شمال شرقی - جنوب غربی است. روش گسترش میدان به سمت بالا (صافی ادامه فراسو) یک صافی پایین‌گذر است که اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با بسامد بالا مثل توده‌های معدنی را حذف و بدین وسیله اثر بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر با طول موج بیشتر مثل توده‌های نفوذی را بهتر آشکار می‌کند (گانو و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش، داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده به وسیله رابطه (۱) از سطح برداشت داده‌ها بر روی سطوح تراز بالاتر از سطح برداشت تصویر می‌شوند (هندرسون و زیتز، ۱۹۴۹):

$$P(x, y, -z) = -\int_0^{\infty} \frac{\bar{P}(r)zrdr}{(r^2 + z^2)^{1.5}}, \quad (1)$$

که $P(x, y, -z)$ مقدار هم‌ارز میدان در یک نقطه بر روی سطح دیگری در بالای سطح مبنا با فرض مثبت بودن Z به طرف پایین است. همچنین $\bar{P}(r)$ مقدار میانگین میدان P در اطراف دایره‌ای به شعاع r است و به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\bar{P}(r) = \frac{1}{2\pi} \int P(r, \varphi) d\varphi, \quad (2)$$

بر روی داده‌های مغناطیسی منطقه مورد مطالعه، صافی ادامه فراسو اعمال و نقشه‌های گسترش‌یافته با ارتفاع‌های گسترش مختلف تهیه و ترسیم شد (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه‌های ادامه فراسو (الف) ۱۵ متر، (ب) ۶۰ متر، (ج) ۱۰۰ متر، (د) ۱۳۰ متر.

بردار داده‌های مشاهده‌ای بی‌هنجاری
 با استفاده از رابطه (۳) به منبع تولید
 بی‌هنجاری مرتبط می‌شود (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۶):

$$d = G\kappa, \tag{۳}$$

که $\kappa = (\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)^T$ بردار مغناطیس‌پذیری
 یاخته‌ها است. ماتریس G دارای درایه‌های g_{ij} است که
 مغناطیس‌پذیری i امین یاخته را به i امین داده مرتبط می-
 کند. برای وارون‌سازی داده‌های مغناطیس، وارون‌سازی
 به یک مسئله بهینه‌سازی تابع هدف (ϕ) تبدیل می‌شود.

آورد. در روش مغناطیس‌سنجی، خاصیت فیزیکی مورد
 نظر، مغناطیس‌پذیری (Susceptibility) مواد زیرسطحی
 است (اسپایسر و همکاران، ۲۰۱۱).

در اینجا به منظور وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی از
 نسخه چهارم نرم‌افزار Mag3D تهیه شده در دانشگاه
 بریتیش کلمبیا کانادا استفاده شد. روش مدل‌سازی وارون
 مورد استفاده در این نرم‌افزار را لی و الدنبرگ (۱۹۹۶)
 ارائه داده‌اند. در این مدل‌سازی محدوده مدل به m توری
 (مش) مکعب‌مستطیل تقسیم شده، سپس برای هر توری
 مقدار ثابت مغناطیس‌پذیری محاسبه می‌شود.

برازش تعیین شده حاصل شود. K^l, K^u به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه مغناطیس‌پذیری هستند که به صورت قید وارد می‌گردند. تابع نبود برازش به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_d = \|W_d(G\kappa - d)\|^2, \quad (5)$$

که W_d ماتریس قطری است و λ مین درایه آن از رابطه:

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i}, \quad (6)$$

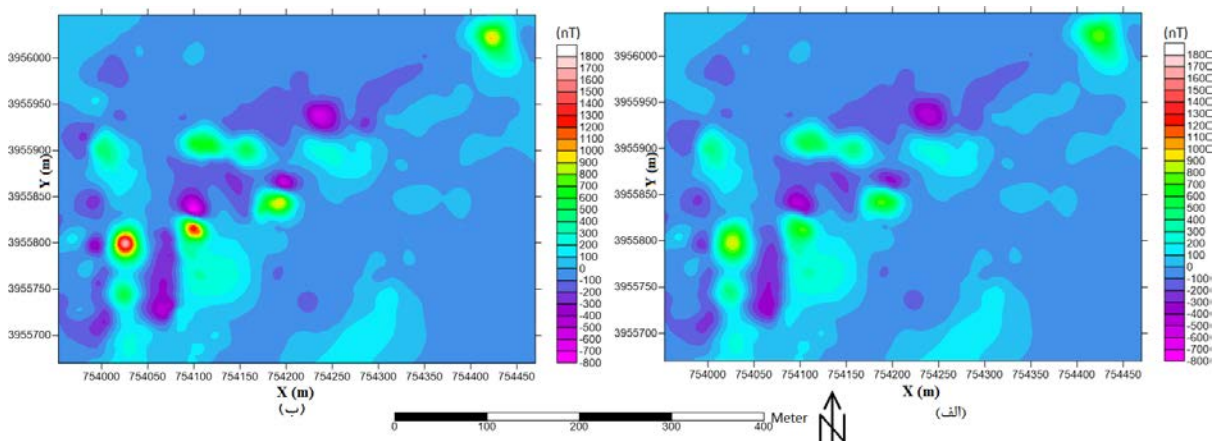
به دست می‌آید که در آن σ_i انحراف معیار λ مین داده است. تابع هدف مدل با رابطه زیر تعریف می‌شود:

سپس این تابع هدف برحسب رابطه (۳)، کمینه می‌شود. تابع هدف از دو جزء تابع نبود برازش داده‌ها (ϕ_d) و تابع هدف مدل (ϕ_m) تشکیل شده است، به طوری که شرط زیر صدق کند:

$$\begin{aligned} \min \phi &= \phi_d + \beta \phi_m \\ \kappa^l &\leq \kappa \leq \kappa^u, \end{aligned} \quad (4)$$

که β پارامتر منظم‌سازی است و اهمیت نسبی هموار بودن مدل از طریق تابع هدف مدل را نسبت به تابع نبود برازش داده‌ها، کنترل می‌کند. هنگامی که انحراف معیار خطای داده‌ها مشخص است، مقدار نبود برازش پذیرفتنی تعیین می‌شود. λ مین می‌توان مقدار β را با معیار منحنی- L تعیین کرد (هنسن، ۱۹۹۲)، به طوری که مقدار نبود

$$\begin{aligned} \phi_m(\kappa) &= \alpha_s \int_V w_s \{w(z)[\kappa(r) - \kappa_0]\}^2 dv + \alpha_x \int_V w_x \left\{ \frac{w(z)[\kappa(r) - \kappa_0]}{\partial x} \right\}^2 dv \\ &+ \alpha_y \int_V w_y \left\{ \frac{w(z)[\kappa(r) - \kappa_0]}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int_V w_z \left\{ \frac{w(z)[\kappa(r) - \kappa_0]}{\partial z} \right\}^2 dv, \end{aligned} \quad (7)$$



شکل ۵. نقشه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (الف) حاصل از مدل‌سازی وارون و (ب) نقشه میدان مغناطیسی محدوده.

اختصاص داده شد. سپس محدوده مدل‌سازی به توری-هایی با ابعاد $5 \times 10 \times 10$ متر تقسیم و مقدار مغناطیس‌پذیری بیشینه یک و کمینه صفر به صورت قید به مدل اضافه شد. سپس وارون‌سازی سه‌بعدی بر روی داده‌های مغناطیس منطقه اجت‌آباد انجام گرفت (شکل ۵).

مطابق شکل ۵ می‌توان گفت که نتایج حاصل از مدل‌سازی وارون و نقشه اولیه داده‌های مغناطیسی انطباق خوبی با هم دارند. به منظور بررسی وضعیت و گسترش عمقی کانسار و توده‌های بی‌هنجار دو پروفیل (مقاطع M-M' و P-P') بر روی نقشه بی‌هنجارهای مغناطیسی در نظر گرفته شد که بیشتر بی‌هنجاری‌ها را قطع می‌کنند (شکل-های ۶ و ۷). در این شکل‌ها، نتایج مدل‌سازی هشت توده بی‌هنجار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بین این توده‌ها، توده H مغناطیس‌پذیری کمتری داشته و نسبت به سایر توده‌ها در عمق بیشتری واقع شده است. به نظر می‌رسد که این بی‌هنجاری ناشی از وجود یک توده نفوذی بوده که کانی‌سازی در آن انجام نگرفته است، ولی سایر توده‌ها مغناطیس‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند و احتمال کانی‌سازی در آنها بالا بوده است.

به منظور بررسی ویژگی‌های توده‌های کانی‌سازی شده، مقدار اختلاف مغناطیس‌پذیری SI 0.067 به مثابه حد آستانه‌ای برای جدایش توده‌های بی‌هنجار کانی‌سازی شده از سایر توده‌ها در نظر گرفته شد (شکل ۸). نتایج این بررسی نشان می‌دهد که عمق بخش بالایی کانسار در بیشتر توده‌های کانی‌سازی شده بین ۱۰ تا ۱۵ متر است. از این بین تنها عمق سطح بالایی توده F حدود ۲۵ متر برآورد شده است. در بین این توده‌های معدنی، توده B با گسترش عمقی حدود ۱۰۰ متر، بیشترین گسترش عمقی را دارد (جدول ۱).

البته باید توجه داشت که چون ابعاد یاخته‌ها در امتداد عمق، ۵ متر است، دقت عمق‌های به دست آمده از روش وارون‌سازی سه‌بعدی ± 5 متر است.

که W_s, W_x, W_y, W_z توابع وزنی وابسته به مکان هستند، در حالی که $\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ ضرایبی هستند که اهمیت نسبی اجزاء مختلف تابع هدف مدل را تعیین می‌کنند. در نهایت $W(z)$ تابع وزنی مرتبط با عمق است که برای داده‌های مغناطیس به شکل زیر تعریف می‌شود (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۶):

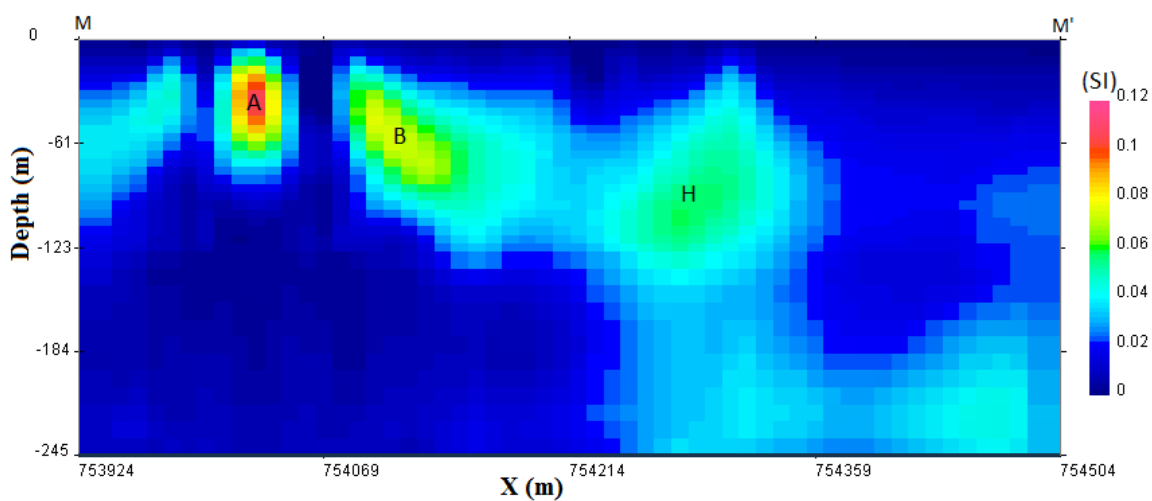
$$W(z) = \frac{1}{(z + z_0)^{3/2}}, \quad (8)$$

که z عمق مرکز یاخته بوده و z_0 پارامتر تنظیم‌پذیری است که باعث می‌شود تابع وزنی تباین مغناطیس‌پذیری با افزایش عمق کاهش یابد. این تابع وزنی سبب می‌شود تا منابع مغناطیسی در عمق توزیع شده و در اعماق کم متمرکز نشوند (اندرسون و همکاران، ۲۰۱۴). با کمینه‌سازی تابع هدف ϕ می‌توان پارامترهای مدل را به دست آورد.

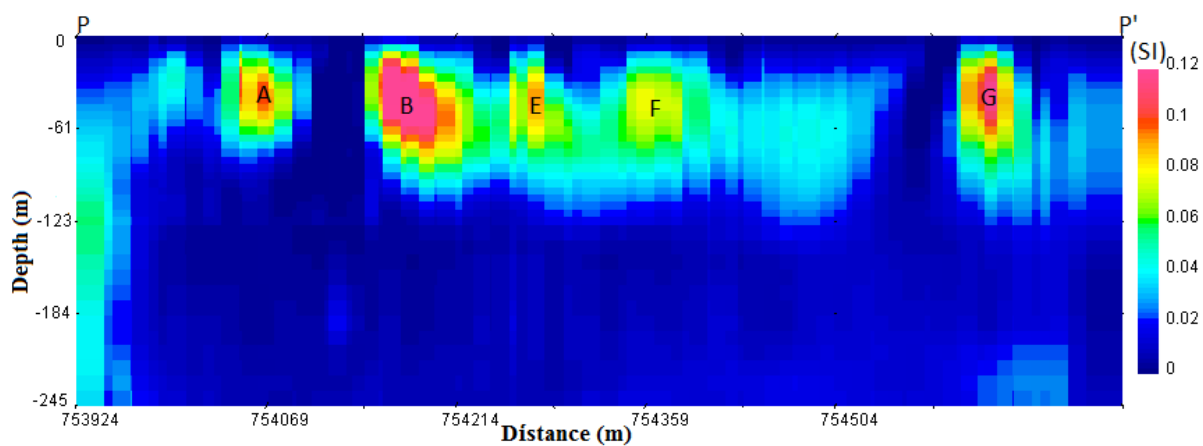
چون داده‌های اندازه‌گیری شده معمولاً دارای مقداری نوفه هستند، هدف اصلی وارون‌سازی داده‌ها به دست آوردن مدل مناسب با استفاده از این داده‌های نوفه‌دار است. به منظور وارون‌سازی داده‌ها با استفاده از این الگوریتم ابتدا لازم است که مقدار نوفه تخمینی موجود در داده‌ها به نرم‌افزار معرفی شود. برای این منظور فرض می‌شود که نوفه موجود در داده‌ها دارای توزیع گوسی است (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۶). خطای ممکن هر داده با توجه به انحراف معیار توزیع گوسی نوفه (σ_i) تعیین می‌شود. در وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در حالتی که تخمینی از مقدار نوفه واقعی داده‌ها وجود ندارد، بهتر است مقدار نوفه گوسی با انحراف معیار پنج درصد (۵٪) به علاوه ۵ نانوتسلا در نظر گرفته شود (ویلیامز، ۲۰۰۸). چون تخمینی از مقدار نوفه واقعی در داده‌های منطقه اجت‌آباد وجود نداشت، به داده‌های منطقه همین مقدار نوفه تخمینی

جدول ۱. عمق بالایی و زیرین به‌دست آمده از توده‌های بی‌هنجار کانی‌سازی شده با استفاده از روش وارون‌سازی سه‌بعدی.

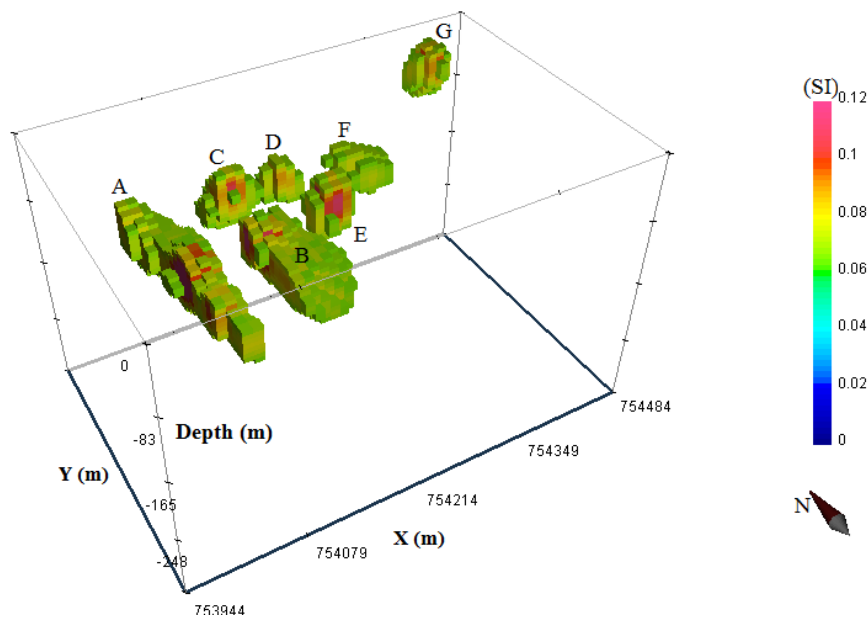
بی‌هنجاری	عمق بالایی (m)	عمق زیرین (m)
A	۱۰	۹۰
B	۱۰	۱۰۰
C	۱۵	۹۰
D	۱۵	۷۰
E	۱۰	۷۵
F	۲۵	۸۰
G	۱۵	۹۰



شکل ۶. برشی قائم در راستای M-M' که بر روی آن توده‌های بی‌هنجار دیده می‌شود.



شکل ۷. پاسخ وارون‌سازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر روی مقطع قائم در راستای P-P' در شکل ۲.



شکل ۸. نمای سه‌بُعدی از ۷ توده بی‌هنجار اصلی.

B بیشترین گسترش عمقی را داشته و تا عمق ۹۰ متری گسترش یافته‌اند (آقاجانی، ۱۳۸۸). این موارد نیز نتایج حاصل از بررسی‌های کمی و کیفی داده‌های این منطقه را تایید می‌کند.

۵ نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های اولیه داده‌های مغناطیس‌سنجی در محدوده اکتشافی ۸ توده مغناطیسی نشان می‌دهد که برخی از آنها از گسترش سطحی مناسبی برخوردار هستند. مدل‌سازی وارون این داده نشان می‌دهد که تعداد بی‌هنجاری‌های محدوده مشابه نتایج داده‌های مغناطیس بوده و از میان ۸ توده مدل‌سازی شده، به نظر می‌رسد که اثر مغناطیسی توده نامگذاری شده با H مربوط به توده نفوذی با میزان کانی‌سازی کم باشد که گسترش عمقی آن از سایر توده‌ها بیشتر است، درحالی‌که تصور می‌شود عمده کانی‌سازی در ۷ توده دیگر صورت گرفته است. با توجه به نتایج

همچنین باید توجه داشت که عمق زیرین حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌ها لزوماً مرز زیرین توده‌ها از نظر زمین‌شناسی نیست، بلکه عمقی است که داده‌ها برای اعماق بیشتر از آن نسبت به ماده مغناطیسی حساس نیستند (ریبرو و همکاران، ۲۰۱۳). به‌رحال انتظار می‌رود که بیشترین عمق کانی‌سازی در این محدوده حدود ۱۰۰ متر باشد.

براساس مشاهدات صحرائی تونل کوچکی در نزدیکی بی‌هنجاری C وجود دارد. در تونل مذکور عمق بالایی ماده معدنی ۱۳ تا ۱۵ متر است. همچنین ترانشه بزرگی بر روی بی‌هنجاری A حفر گردیده است که در این ترانشه عمق بالایی ماده معدنی ۱۰ تا ۱۵ متر است. آثار این معدن‌کاری‌های قدیمی نتایج حاصل از بررسی کمی و کیفی داده‌های مغناطیسی را تایید می‌کند. کاربست روش گرادیان کل به‌هنجار شده دو‌بُعدی و سه‌بُعدی بر روی داده‌های مغناطیس این منطقه نشان داده است که گسترش عمقی کانی‌سازی کمتر از ۱۰۰ متر است و توده‌های A و

- regional-scale aeromagnetic data: *Geophysics*, **79**, B63–B79.
- Baranov, V., and H. Naudy, 1964, Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole: *Geophysics*, **29**, 67–79.
- Belich, A. I., and Bragin, Y. D., 1993. Ore deposits of Iran: *Vniizarubezh Geologiya press*, 294 p (in Russian).
- Carlos, D. U., Uieda, L., and Barbosa V. C. F., 2014, Imaging iron ore from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil) using geophysical inversion and drill hole data: *Ore Geology Reviews*, **61**, 268–285.
- Cordani R., 2013, Constrain modelling in iron ore exploration: presented at 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Awoyemi, M. O., Akinyemi, O. D., Olurin, O. T., 2013, Upward continuation and reduction to pole process on aeromagnetic data of Ibadan area, South-Western Nigeria: *Earth Science Research*, **2**, 66–73.
- Hansen, P. C., 1992, Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve: *SIAM Review*, **34**, 561–580.
- Henderson, R. G., and Zietz, I., 1949, The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields: presented at St. Louis Meeting of the Society, U. S. Geological survey.
- Jacobsen, B. H., 1987, A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps: *Geophysics*, **52**, 1138–1148.
- Li, S., and Li, Y., 2012, Inversion of magnetic anomaly affected by strong remanent magnetization over rugged terrain: A case study from Daye, China: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1–5.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1996, 3-D inversion of magnetic data: *Geophysics*, **61**, 394–408.
- Spicer, B., Morris, B., Ugalde, H., 2011, Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: مدل‌سازی در راستای پروفیل‌های مورد نظر می‌توان عنوان کرد که در بین این توده‌های مستعد محدوده، توده B با عمق حدود ۱۰۰ متر بیشترین گسترش عمقی را دارا بوده و همچنین به همراه توده A بیشترین حجم کانی‌سازی را نیز به خود اختصاص داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که عمق بخش بالایی کانسار در بیشتر توده‌های کانی‌سازی شده بین ۱۰ تا ۱۵ متر است. این موضوع به شکل آثار معدن-کاری قدیمی در نزدیکی بی‌هنجاری C (به‌صورت تونلی کوچک) و بی‌هنجاری A (ترانشه‌ای بزرگ) نیز قابل مشاهده است.
- منابع**
- مرادزاده، ع.، دولتی ارده‌جانی، ف.، و طیبی، ب.، ۱۳۸۵، تفسیر کیفی داده‌های مغناطیسی کانسار آهن اجت آباد سمنان: بیست‌وپنجمین همایش علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۷–۱۰۹.
- قربانی، م.، ۱۳۸۱، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی اقتصادی ایران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، گزارش ۲.
- عابدی، آ.، فردوست، ف.، خزاعی، م.، و سعیدی، س.، ۱۳۸۷، بررسی فازهای کانی‌سازی آهن در معدن آهن اجت‌آباد، شمال شرق سمنان: شانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران.
- آقاجانی، ح.، ۱۳۸۸، بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال‌شده داده‌های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله‌های نفتی: رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Anderson, E. D., Zhou, W., Li, Y., Hitzman, M. W., Monecke, T., Lang, J. R., and Kelley, K. D., 2014, Three-dimensional distribution of igneous rocks near the pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit in southwestern Alaska: Constraints from

- Western Australia: PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Ribeiro, V. B., Louro, V. H. A., and Mantovani, M. S. M., 2013, 3D Inversion of magnetic data of grouped anomalies — Study applied to São José intrusions in Mato Grosso, Brazil: *J. Applied Geophysics*, **93**, 67–76.
- Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D: *J. Applied Geophysics*, **75**, 9–18.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. C., 1991, *Applied Geophysics: 2nd edition*, Cambridge University Press.
- Williams, N. C., 2008, *Geologically Constrained UBC-GIF Gravity and Magnetic Inversions with Examples from the Agnew-Wiluna Greenstone Belt*,