



آشکار سازی مرز ساختارهای زیر سطحی با استفاده از روش انحنای تانسور گرادیان داده‌های مغناطیس سنجی

محمد رضایی

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۵

نویسنده مسئول مکاتبات: mohamad Irezaie@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

روش مغناطیس سنجی یکی از روش‌های پرکاربرد ژئوفیزیکی است. آشکار سازی لبه ساختارهای زیر سطحی یکی از اهداف مهم تفسیر داده‌های مغناطیس سنجی است. روش‌های متعددی برای آشکار سازی لبه ساختارهای زیر سطحی با استفاده از داده‌های میدان پتانسیل ارائه شده است؛ که در بین این روش‌ها، روش زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان می‌توانند مرز ساختارهای زیر سطحی را به شکل کمی تعیین نماید. در این مقاله کاربرد روش انحنای تانسور گرادیان برای آشکار سازی لبه ساختارهای زیر سطحی با استفاده از داده‌های مغناطیس سنجی، مورد بررسی قرار گرفت. اعمال این روش بر روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های مغناطیس سنجی کانسار مس پرفیری قاهان نشان داد که مقدار ویژه کوچک ماتریس انحنای تانسور گرادیان می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی ایجاد می‌کند؛ را به صورت کمی تعیین نماید و مقدار ویژه بزرگ این ماتریس می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری منفی مغناطیس ایجاد می‌کند را به صورت کمی تعیین نماید. همچنین نتایج نشان داد که روش انحنای تانسور گرادیان مرز ساختارهای زیر سطحی را با دقت بیشتری نسبت به روش زاویه تمایل تعیین می‌نماید و حساسیت این روش به نوفه موجود در داده‌ها نسبت به روش زاویه تمایل کمتر است.

مغناطیس سنجی
آشکار سازی لبه
تانسور گرادیان
زاویه تمایل
ساختارهای زیر سطحی
قاهان
مس پرفیری

تعیین می‌گردد. روش انحنای تانسور گرادیان گرانی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی به کار گرفته شده است (Oruç et al., 2013). با استفاده از این روش نیز می‌توان مرز ساختارهای زیرسطحی را به شکل کمی مشخص نمود. بدین صورت که مقادیر ویژه ماتریس انحنای گرادیان بر روی مرز ساختارهای زیرسطحی برابر صفر است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که در گرانی سنجی مقدار ویژه کوچک می‌تواند برای تعیین مرز توده‌هایی با اختلاف چگالی مثبت به کار رود و مقدار ویژه بزرگ برای شناسایی مرز توده‌هایی با اختلاف چگالی منفی به کار رود (Zhou et al., 2013).

با توجه به مطالب بیان شده، در میان روش‌های مختلف شناسایی لبه، روش‌های زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان، روش‌هایی هستند که می‌توانند لبه‌های ساختارهای زیرسطحی را به طور کمی مشخص نمایند. در این مقاله، کاربرد روش انحنای تانسور گرادیان برای آشکارسازی لبه ساختارهای زیرسطحی با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا روش انحنای تانسور گرادیان و زاویه تمایل بر روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی اعمال می‌شود و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شود. در نهایت روش انحنای تانسور گرادیان بر روی داده‌های مغناطیس‌کنسار مس پرفیری قاهان استان مرکزی اعمال می‌گردد و مرز ساختارهای زیرسطحی در این منطقه تعیین و نتایج با اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوشیمی و زمین‌شناسی مقایسه می‌شوند.

۲- روش کار

به منظور اعمال روش‌های زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان بر روی داده‌های حاصل از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی، باید پس از انجام اصلاحات لازم بر روی این داده‌ها، فیلتر برگردان به قطب مغناطیسی بر روی این داده‌ها اعمال شود؛ تا این‌که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی از نظر مکانی به طور دقیق بر روی توده‌های عامل بی‌هنجاری قرار گیرد. سپس، روش‌های زاویه تمایل و انحنای تانسور گرادیان بر روی داده‌های برگردان به قطب شده اعمال می‌شود؛ تا مرز ساختارهای عامل بی‌هنجاری آشکار شود.

۲-۱- روش انحنای تانسور گرادیان

به کمک ماتریس انحنای تانسور، مقدار انحنای یک خط یا سطح را در یک نقطه بر روی آن خط یا سطح مشخص نمود. ماتریس انحنای گرادیان میدان مغناطیسی به شکل زیر تعریف می‌شود (Oruç et al., 2013):

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \frac{\partial T_x}{\partial x} & \frac{\partial T_x}{\partial y} \\ \frac{\partial T_y}{\partial x} & \frac{\partial T_y}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

یکی از اهداف اصلی تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی، استخراج اطلاعات در مورد ساختارهای زیرسطحی است. آشکارسازی لبه (Edge detection)، روشی مهم در شناسایی محدوده و لبه ساختارهای زمین‌شناسی است؛ بنابراین به شکل سنتی، آشکارسازی لبه هدف مهمی در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی است. تاکنون روش‌های متعددی برای آشکارسازی لبه با استفاده از داده‌های گرانی و مغناطیس ارائه شده است که در بیشتر این روش‌ها، فرض بر این است که داده‌های مغناطیس‌سنجی برگردان به قطب مغناطیسی شده‌اند. برای مثال روش‌های گرادیان افقی کل (Grauch and Cooper, 1987; Fedi and Florio, 2001)، مشتق قائم (Cooper and Cowan, 2003) و زاویه تمایل (Miller and Singh, 1994). با استفاده از روش زاویه تمایل (Tilt angle) می‌توان مرزهای ساختارهای زیرسطحی را به شکل کمی مشخص نمود. بدین صورت که مقدار زاویه تمایل بر روی مرز ساختارها برابر صفر است (Miller and Singh, 1994). روش مشتق افقی کل زاویه تمایل روش دیگری است که برای شناسایی لبه پیشنهاد شده است (Verduzco et al., 2004). شاهوردی و همکاران (۱۳۹۶) روش زاویه تمایل بهبود یافته را به کار گرفته و مرز ساختارهای زمین‌شناسی فروافتادگی زجان را با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی شناسایی نمودند. روش نقشه زاویه تان نیز برای شناسایی لبه توسعه داده شده است (Wijns et al., 2005). نجاتی و روشندل (۱۳۹۲) این روش را برای شناسایی لبه داده‌های گرانی به کار گرفتند. در این روش مقدار اندازه گرادیان کل نسبت به مقدار گرادیان افقی نرمال می‌شود. تابع تانژانت هاپربولیک برای محاسبه زاویه تمایل به کار برده شد؛ تا مرز ساختارهای زیرسطحی بهتر شناخته شود (Cooper and Cowan, 2006). روش‌های فوق به دلیل استفاده از مشتق‌های میدان پتانسیل معمولاً عملکرد مناسبی در حضور نوفه ندارند. عزیزلو و اردستانی (۱۳۹۶) از روش واریانس ناهمسانگردی نرمال شده برای تعیین مرز توده‌های گرانی استفاده نمودند. در این روش مقدار عدد پنجره و یک ضریب وجود دارد؛ که به وسیله کارشناس تعیین می‌شود. روشی برای شناسایی خطواره‌ها با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده ارائه شده است؛ که بر اساس مقدار انحنای گرادیان افقی کل کار می‌کند (Hansen and Deridder, 2006). این روش انحنای تانسور برای بهبود تخمین عمق و اندیس ساختاری چشمه میدان پتانسیل به کار گرفته شد (بrazش و متولی، ۱۳۹۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که با به کارگیری مقدار انحنای داده‌ها به جای مشتق‌های داده‌ها می‌توان شناسایی لبه داده‌های میدان پتانسیل را بهبود بخشید (Cooper and Cowan, 2009). انصاری و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از محاسبه انحنای میدان پتانسیل مرز ساختارهای زیرسطحی را مشخص نمودند. در این روش مرز ساختارهای زیرسطحی به شکل کیفی

$$\lambda_2 = 0.5 \left(T_{xx} + T_{yy} - \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \right) \quad (9)$$

که λ_1 مقدار ویژه بزرگ و λ_2 مقدار ویژه کوچک است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که در گرانی‌سنجی مقادیر λ_2 می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری مثبت گرانی ایجاد می‌کند را تعیین نماید؛ به گونه‌ای که مقدار λ_2 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است. از طرف دیگر مقادیر λ_1 می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری منفی گرانی ایجاد می‌کند را تعیین نماید به گونه‌ای که مقدار λ_1 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است (Zhou et al., 2013). در این مقاله با استفاده از مقادیر λ_1 و λ_2 لبه توده‌های عامل بی‌هنجاری مغناطیسی شناسایی می‌شود.

۲-۲- روش زاویه تمایل

فیلتر زاویه تمایل یکی از فیلترهای فاز محلی برای شناسایی لبه است. فیلترهای فاز محلی با تغییر فازی که در داده به وجود می‌آورند؛ لبه‌های ساختارهای زیرسطحی را به خوبی بارز می‌کنند؛ اما نوفه موجود در داده را نیز افزایش می‌دهند. فیلتر زاویه تمایل به شکل زیر تعریف می‌شود (Miller and Singh, 1994):

$$\text{Tilt} = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}} \right) \quad (10)$$

فیلتر زاویه‌ی تمایل دامنه‌ی بی‌هنجاری‌های عمیق‌تر را نسبت به سطحی تقویت می‌کند. مقدار این زاویه زمانی که بالای منبع بی‌هنجار قرار می‌گیرد، مثبت بوده و زمانی که بالا یا نزدیک لبه‌های آن منبع قرار گیرد، صفر می‌شود و می‌تواند تا حدودی به شکل کمی مرز ساختارهای زیرسطحی را مشخص نماید (Miller and Singh, 1994).

۲-۳- اعمال روش پیشنهادی بر روی داده‌های

مصنوعی

به منظور بررسی کاربرد روش انحنا تانسور گرادیان در تعیین و شناسایی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و همچنین آشکارسازی مرز آن‌ها و تفکیک لبه‌ها، از یک مدل مصنوعی استفاده شد. یک مدل مصنوعی طراحی شد که شامل دو بلوک در ابعاد و در عمق‌های متفاوت است (شکل ۱).

داده‌های حاصل از این مدل مصنوعی با استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو ارائه شده توسط Rao and Babu (1991) بر روی شبکه‌ای منظم با فواصل 20×20 متر و با گسترش 600×600 متر محاسبه شده است. موقعیت و ابعاد بلوک‌های تشکیل‌دهنده مدل مصنوعی در جدول ۱ ارائه شده است.

برای بررسی کارایی مقادیر λ_1 و λ_2 در آشکارسازی لبه ساختارهای زیرسطحی با استفاده از داده‌های مغناطیسی سنجی یک

که در آن T_x و T_y مؤلفه‌های افقی بردار میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده در جهت‌های x و y هستند. مؤلفه‌های ماتریس انحنا گرادیان میدان مغناطیسی را می‌توان با استفاده از داده‌های میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده (T) محاسبه نمود (Mickus and Hinojosa, 2001):

$$\Gamma = F^{-1} \{K(k)T_F(k)\} \quad (2)$$

در این رابطه، F^{-1} نماد تبدیل فوریه معکوس است؛ $T_F(k)$ تبدیل فوریه میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده است؛ که در آن k عدد موج است و $K(k)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K(k) = \begin{bmatrix} \frac{-k_x^2}{|k|} & \frac{-k_x k_y}{|k|} \\ \frac{-k_y k_x}{|k|} & \frac{-k_y^2}{|k|} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن $|k| = (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2} \neq 0$. به طور معمول در روش‌های میدان پتانسیل بی‌هنجاری ایجاد شده با اختلاف خاصیت فیزیکی توده عامل بی‌هنجاری با سنگ‌های دربرگیرنده، هم علامت است؛ در حالی که برای بردارهای گرادیان افقی T_{xx} و T_{yy} این مسئله صادق نیست؛ بنابراین این دو بردار معمولاً در عدد منفی یک ضرب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند (Fedi et al., 2005). در ادامه با چرخش محورها در راستای بردارهای ویژه ماتریس انحنا گرادیان میدان مغناطیسی می‌توان نوشت:

$$\Gamma x = \Lambda x \quad (4)$$

که در آن $x \neq 0$ ماتریسی است که ستون‌های آن بردارهای ویژه ماتریس Γ است و Λ ماتریس مقادیر ویژه است (Boring, 1998):

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد (Boring, 1998):

$$(\Gamma - \Lambda)x = 0 \quad (6)$$

که در آن I ماتریس همانی است. برای برقراری رابطه (۶)، باید ماتریس $\Gamma - \Lambda I$ تکین باشد؛ یعنی دترمینان آن برابر با صفر باشد:

$$\det(\Gamma - \Lambda I) = \begin{vmatrix} T_{xx} - \lambda_1 & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} - \lambda_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

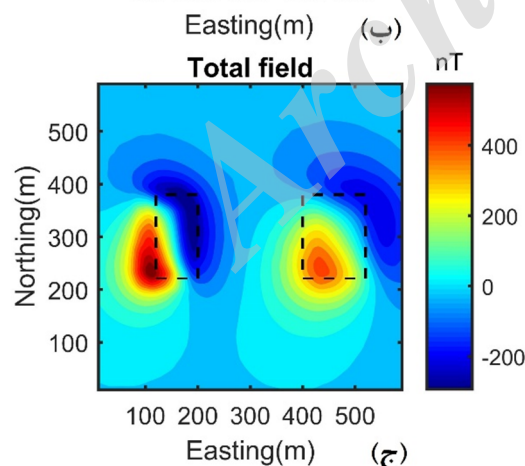
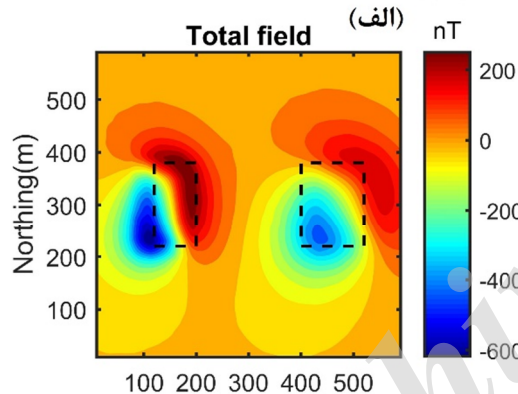
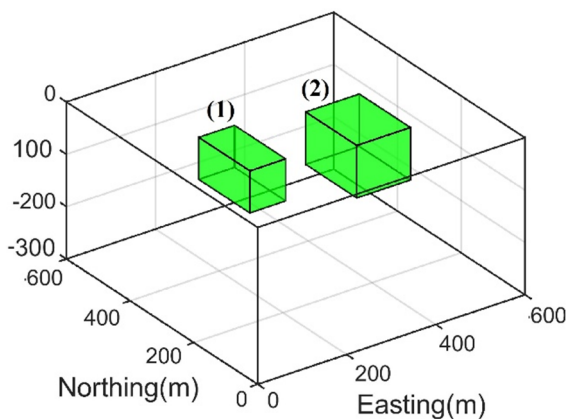
با حل نمودن معادله رابطه (۷)، مقادیر ویژه تانسور Γ که λ_1 و λ_2 هستند؛ به صورت زیر به دست می‌آید (Oruç et al., 2013):

$$\lambda_1 = 0.5 \left(T_{xx} + T_{yy} + \sqrt{(T_{xx} - T_{yy})^2 + 4T_{xy}^2} \right) \quad (8)$$

برابر با صفر است.

جدول ۱: موقعیت و ابعاد هر یک از بلوک‌ها در مدل مصنوعی.

شماره مدل	ابعاد بلوک‌ها (متر)	عمق سطح بالایی (متر)
(۱)	۸۰×۱۶۰×۸۰	-۲۰
(۲)	۱۲۰×۱۶۰×۱۰۰	-۴۰



شکل ۱: نمای سه بعدی از قرارگیری بلوک‌ها در مدل مصنوعی (الف).

نقشه میدان مغناطیسی داده‌های آغشته به نوفه برای مدل با اختلاف خودپذیری مغناطیسی منفی (ب) و اختلاف خودپذیری مغناطیسی مثبت (ج). موقعیت بلوک‌ها با خط چین در شکل‌ها مشخص شده است.

بار در محاسبه داده‌های مغناطیسی اختلاف خودپذیری مغناطیسی توده‌ها با زمینه (SI) -0.06 در نظر گرفته شده است (شکل ۱-ب)؛ و بار دیگر اختلاف خودپذیری مغناطیسی توده‌ها با زمینه (SI) $+0.06$ در نظر گرفته شده است (شکل ۱-ج). بدین ترتیب بی‌هنجاری‌های منفی و مثبت مغناطیسی ایجاد می‌شود.

سپس به داده‌ها ۵٪ نوفه تصادفی با توزیع گوسی اضافه شده است. در این مدل مصنوعی مقدار زاویه میل و انحراف مغناطیسی ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است و شدت میدان مغناطیسی القاکننده برابر با 48000 (nT) است. برای محاسبه مقادیر λ_1 و λ_2 ابتدا، داده‌ها برگردان به قطب شد (شکل ۲). سپس مقادیر λ_1 ، λ_2 و زاویه تمایل برای داده‌های برگردان به قطب شده محاسبه گردید.

شکل ۳ نتایج حاصل از اعمال روش‌های شرح داده شده در قسمت قبل، بر روی داده‌های نمایش داده شده در شکل ۲- الف را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳، با توجه به مرز توده‌های زیرسطحی (که با خط چین نشان داده شده است) و خط تراز صفر (که با خط مشکی نشان داده شده است) روی نقشه نتیجه حاصل از اعمال روش‌های مختلف آشکارسازی لبه، می‌توان نتیجه گرفت که خط تراز صفر در روش λ_1 محل قرارگیری توده‌های زیرسطحی را به خوبی مشخص نموده و بر مرز واقعی توده‌های زیرسطحی که بی‌هنجاری منفی مغناطیسی ایجاد کرده است تا حدود زیادی منطبق است. از طرف دیگر به نظر می‌رسد حساسیت این روش نسبت به نوفه در مقایسه با روش زاویه تمایل کمتر بوده و تصویر هموارتری ایجاد کرده است. در حالی که در روش زاویه تمایل خط تراز صفر از مرز واقعی توده‌های زیرسطحی کمی فاصله دارد و در تصویر به دست آمده به دلیل نوفه ناهمواری‌هایی دیده می‌شود.

شکل ۴ نتایج حاصل از اعمال روش‌های شناسایی لبه بیان شده در این مقاله بر روی داده‌های نمایش داده شده در شکل ۲- ب را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۴، با توجه به مرز توده‌های زیرسطحی و خط تراز صفر روی نقشه نتیجه حاصل از اعمال روش‌های مختلف شناسایی لبه، می‌توان نتیجه گرفت که خط تراز صفر در روش λ_2 محل قرارگیری توده‌های زیرسطحی را بهتر مشخص نموده و به مرز واقعی توده‌های زیرسطحی که بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی ایجاد کرده، نزدیک‌تر است. مشابه حالت قبل به نظر می‌رسد حساسیت روش انحنای تانسور گرادیان نسبت به نوفه در مقایسه با روش زاویه تمایل کمتر بوده است.

مشابه روش گرانی سنجی، مقادیر λ_2 می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی ایجاد می‌کند را به صورت کمی تعیین نماید؛ به گونه‌ای که مقدار λ_2 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است و مقادیر λ_1 می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری منفی مغناطیسی ایجاد می‌کند را به صورت کمی تعیین نماید؛ به گونه‌ای که مقدار λ_1 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری

مغناطیسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

برای این که بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به طور دقیق بر روی توده‌های عامل بی‌هنجاری قرار گیرد؛ فیلتر برگردان به قطب بر روی داده‌ها اعمال شد (شکل ۵-ب). مطابق این شکل یک بی‌هنجاری منفی مغناطیسی در نواحی مرکزی محدوده مورد مطالعه دیده می‌شود که به احتمال زیاد این بی‌هنجاری مرتبط با کانی سازی مس پرفیری است؛ زیرا در محدوده مورد مطالعه منطقه دگرسانی پتاسیک وجود ندارد و نتایج مطالعات نشان داده است که در کانسارهای مس پرفیری شدت میدان مغناطیسی به دلیل پدیده دگرسانی بر روی کانسار، کاهش می‌یابد (Clark, 2014). بی‌هنجاری‌های مثبتی که در اطراف بی‌هنجاری منفی مغناطیسی قرار گرفته است، به احتمال زیاد مرتبط با محدوده‌های دگرسانی پروپلیتیک است.

نتایج حاصل از اعمال روش انحنای تانسور گرادیان در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶-الف، خط تراز صفر در روش λ_1 محدوده کانی سازی پرفیری را نشان می‌دهد. مطالعات λ_1 محدوده کانی سازی پرفیری در این منطقه نشان داده است که نمونه‌های ژئوشیمیایی تهیه شده از درون محدوده معرفی شده برای کانی سازی پرفیری، دارای بی‌هنجاری مس و مولیبدن است؛ در حالی که نمونه‌های قرار گرفته خارج از محدوده تعیین شده، بی‌هنجاری مس و مولیبدن از خود نشان نداده‌اند. این پدیده نشان‌دهنده دقت روش λ_1 در تعیین مرز توده عامل بی‌هنجاری منفی مغناطیسی است.

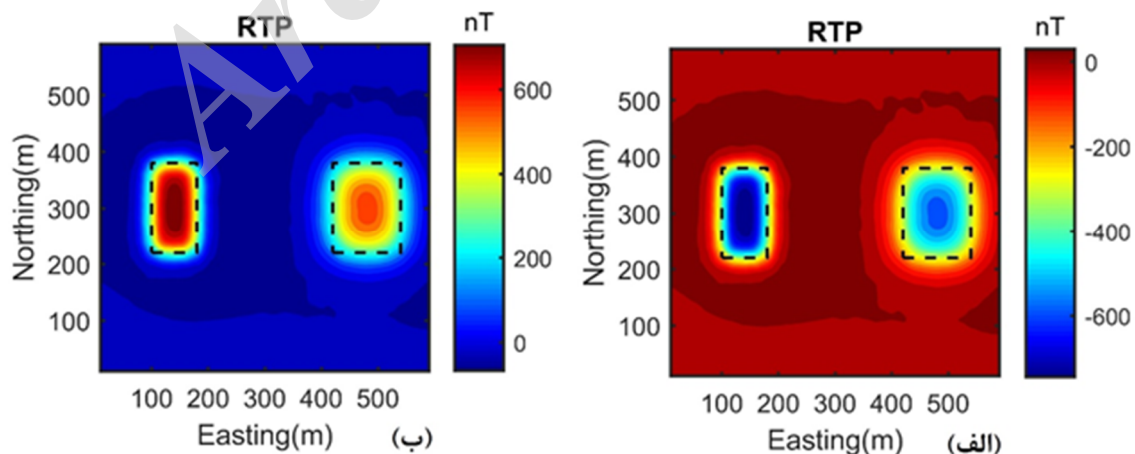
منحنی تراز صفر در روش λ_2 محدوده دگرسانی پروپلیتی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشانگر آن است که فیلتر زاویه تمایل تنها مرز توده‌های زیرسطحی که بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی ایجاد کرده را به صورت کمی با خط تراز صفر تعیین کرده است. هرچند در شناسایی مرز کانسار که عامل اصلی ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی منفی است، به خوبی عمل نکرده است.

۲-۴- اعمال روش پیشنهادی بر روی داده‌های واقعی

در این قسمت، روش‌های شرح داده شده در این مقاله بر روی داده‌های مغناطیس سنجی کانسار مس پرفیری قاهان در استان مرکزی اعمال می‌شود تا مرز کانسار تعیین شود.

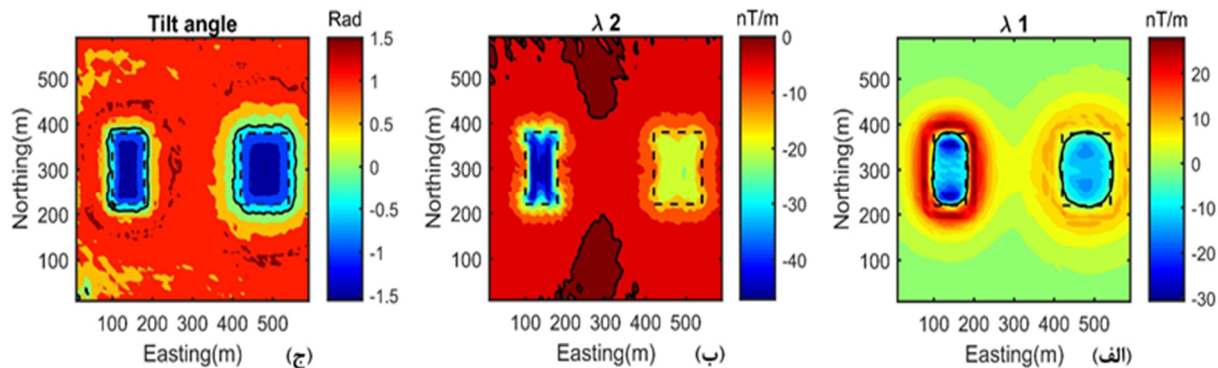
کانسار مس پرفیری قاهان از نظر زمین‌شناسی بر روی کمر بند سنگ‌های ماگمایی ارومیه-دختر قرار دارد. سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی -رسوبی ائوسن بخش عمده سنگ‌های این منطقه را تشکیل می‌دهند؛ که توده بزرگی از جنس دیوریت تا کوارتز دیوریت در آن نفوذ کرده است. پس از آن یک توده پورفیری با ترکیب تونالیت در سنگ‌های منطقه نفوذ نموده و کانی‌سازی پورفیری را ایجاد نموده است. مهم‌ترین دگرسانی‌های مرتبط با کانی‌سازی پورفیری در منطقه شامل، دگرسانی فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک است؛ که دگرسانی فلیک اغلب با استوک‌ورک‌های کوارتزی همراه است. در این منطقه کانی‌سازی در سطح، عمدتاً به صورت اکسیدهای آهنی مشاهده می‌شوند. اکسیدهای آهن از نوع گوتیت، جاروسیت و هماتیت به ترتیب مهم‌ترین اکسیدهای آهنی حاصل از اکسیداسیون سولفیدها می‌باشند؛ که به صورت پراکنده و پراکنده درز و شکاف‌ها مشاهده می‌شوند. نتایج حاصل از چند نمونه ژئوشیمیایی در این منطقه نشان می‌دهد که مس و مولیبدن تا حد زیادی بی‌هنجاری نشان می‌دهند (تیموری، ۱۳۹۱).

در سال ۱۳۹۰ در محدوده مورد نظر مطالعات مغناطیس سنجی انجام شد (شکل ۵). در این منطقه داده‌ها بر روی شبکه‌ای با ابعاد ۵۰ متر در ۲۵ متر برداشت شد؛ به صورتی که فواصل پروفیل‌ها از یکدیگر ۵۰ متر و فواصل ایستگاه‌ها بر روی هر پروفیل ۲۵ متر بود و مجموع نقاط اندازه‌گیری بالغ بر ۱۸۰۰ ایستگاه شد. بر روی داده‌های برداشت شده ابتدا تصحیحات لازم از قبیل تصحیحات روزانه و IGRF اعمال شد (محمدلو، ۱۳۹۶). داده‌های استفاده شده در این پژوهش قسمتی از این داده‌ها است. شکل ۵-الف نقشه بی‌هنجاری

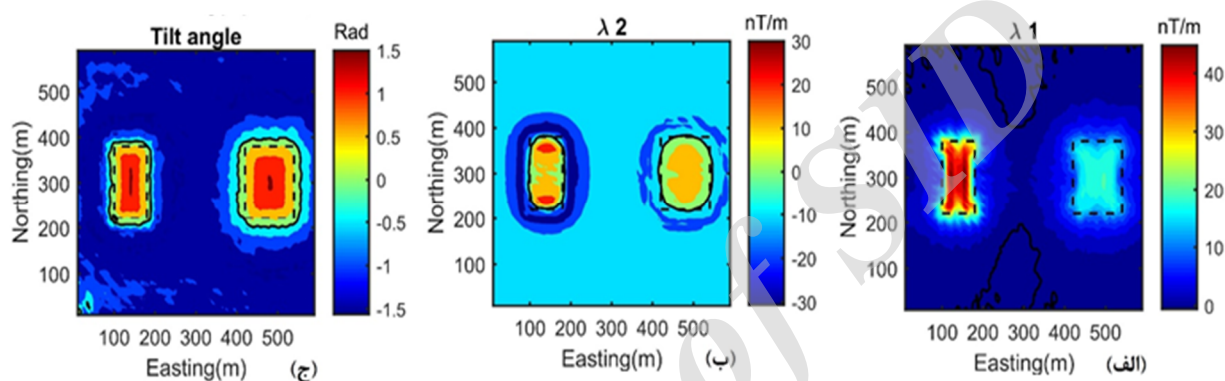


شکل ۲: نقشه داده‌های مغناطیسی برگردان به قطب شده برای مدل با اختلاف خودپذیری مغناطیسی منفی (الف) و اختلاف خودپذیری مغناطیسی مثبت (ب).

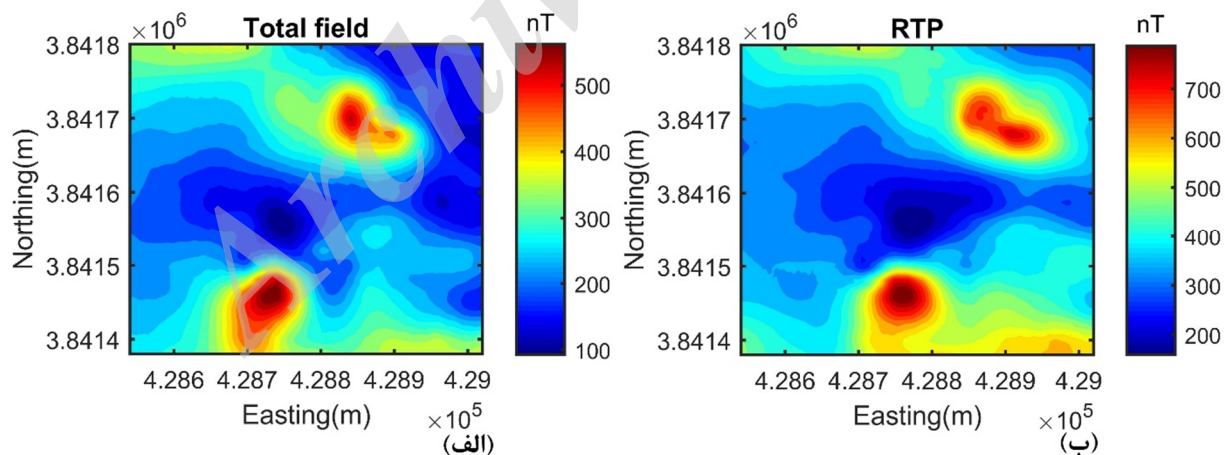
رضایی، آشکارسازی مرز ساختارهای زیرسطحی با استفاده از روش انحنای تانسور گرادیان داده‌های مغناطیسی سنجی، صفحات ۳۸۵-۳۷۷.



شکل ۳: نقشه مقادیر محاسبه شده λ_1 (الف)، λ_2 (ب) و زاویه تمایل با استفاده از داده‌های برگردان به قطب شده مدل مصنوعی با اختلاف خودپذیری مغناطیسی منفی. محل واقعی بلوک‌ها با خط چین مشخص شده و خط تراز صفر با خط مشکی پررنگ نمایش داده شده است.



شکل ۴: نقشه مقادیر محاسبه شده λ_1 (الف)، λ_2 (ب) و زاویه تمایل با استفاده از داده‌های برگردان به قطب شده مدل مصنوعی با اختلاف خودپذیری مغناطیسی مثبت. محل واقعی بلوک‌ها با خط چین مشخص شده و خط تراز صفر با خط مشکی پررنگ نمایش داده شده است.



شکل ۵: نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه قاهان (الف). نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی برگردان به قطب شده منطقه قاهان (ب).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

کمی تعیین نماید؛ به گونه‌ای که مقدار λ_1 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است. همچنین نتایج نشان داد که روش انحنای تانسور گرادیان، مرز ساختارهای زیرسطحی را با دقت بیشتری نسبت به روش زاویه تمایل تعیین نموده و حساسیت این روش به نوفه موجود در داده‌ها نسبت به روش زاویه تمایل کمتر است.

نتایج حاصل از به کارگیری روش انحنای تانسور گرادیان برای شناسایی لبه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کانسار مس قاهان نشان داد که این روش می‌تواند لبه‌های کانسار مس پرفیری را که عامل ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی منفی در منطقه است؛ مشخص نماید. حال آن‌که روش زاویه تمایل تنها مرز ساختارهای عامل بی‌هنجاری‌های مثبت مغناطیسی را مشخص نمود. نتایج حاصل از بررسی‌های ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه انطباق خوبی با نتایج حاصل از به کارگیری روش انحنای تانسور گرادیان دارد.

۴- منابع

انصاری، ع.، علمدار، ک. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹، تراس‌بندی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۲)، ۱۵۷-۱۶۶.

برازش، م. و متولی عنبران، ه.، ۱۳۹۶، بهبود تخمین عمق و اندیس ساختاری چشمه میدان پتانسیل با استفاده از نشانگرهای انحنای، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۳ (۱)، ۷۱-۸۶.

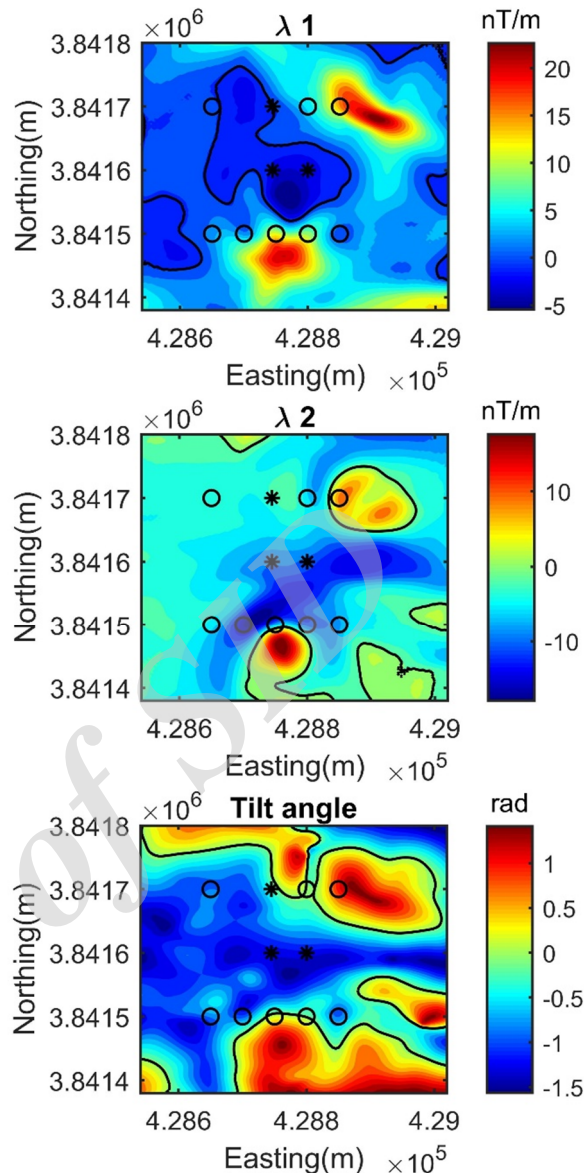
تیموری بادله، ح.، ۱۳۹۱، کاربرد روش سنجش از دور و داده‌های مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف کانسار مس قاهان در شهرستان ساوه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب.

شاهوردی، م.، نمکی، ل.، منتهایی، م.، مصباحی، ف. و بساوند، م.، ۱۳۹۶، تفسیر داده‌های مغناطیسی بر اساس محاسبه زاویه تیلت و بهبود گرادیان افقی، مطالعه موردی: فروافتادگی زنجان، مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۳ (۱)، ۱۰۱-۱۱۳.

صادقی عزیزلو، ب. و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۹۶، بررسی قابلیت روش واریانس ناهمسانگردی نرمال‌شده در تعیین مرز توده‌های گرانی، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۳ (۲)، ۱۸۹-۲۰۱.

محمملو، ع.، ۱۳۹۶، تفسیر و مدل‌سازی مستقیم داده‌های مغناطیس به منظور تعیین سطح فرسایش مناطق کانی‌زایی مس پورفیری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

نجاتی کلاته، ع. و روشندل کاهو، ا.، ۱۳۹۲، تعیین مرز داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از تصویرسازی زاویه تتا، مجله



- * Samples with Cu-Mo anomaly
- O Samples without Cu-Mo anomaly

شکل ۶: نقشه مقادیر محاسبه شده λ_1 (الف)، λ_2 (ب) و زاویه تمایل با استفاده از داده‌های برگردان به قطب شده کانسار مس قاهان. خط تراز صفر با خط مشکی پر رنگ نمایش داده شده است.

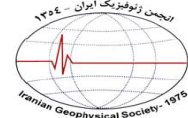
۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش قابلیت روش انحنای تانسور گرادیان در آشکارسازی مرز ساختارهای زیرسطحی با استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. اعمال این روش بر روی داده‌های حاصل از مدل مصنوعی نشان داد که مقدار ویژه کوچک (λ_2) می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری مثبت مغناطیسی ایجاد می‌کند را به صورت کمی تعیین نماید؛ به گونه‌ای که مقدار λ_2 در مرز توده‌های عامل بی‌هنجاری برابر با صفر است و مقدار ویژه بزرگ (λ_1) می‌تواند مرز توده‌هایی که بی‌هنجاری منفی مغناطیس ایجاد می‌کند را به صورت

- Hansen, R.O. and Deridder, E., 2006, Linear feature analysis for aeromagnetic data, *Geophysics*, 71 (6), L61-L67.
- Mickus, K.L. and Hinojosa, J.H., 2001, The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique, *Journal of Applied Geophysics*, 46 (3), 159-174.
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt- A new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2-3), 213-217.
- Oruç, B., Sertçelik, I., Kafadar, Ö. and Selim, H.H., 2013, Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief, *Journal of Applied Geophysics*, 88, 105-113.
- Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping, *The Leading Edge*, 23 (2), 116-119.
- Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: Edge detection in magnetic data. *Geophysics*, 70 (4), L39-L43.
- Zhou, W., Du, X. and Li, J., 2013, The limitation of curvature gravity gradient tensor for edge detection and a method for overcoming it, *Journal of Applied Geophysics*, 98, 237-242.
- Boring, E., 1998, Visualization of tensor fields, M.S. thesis, University of California, Santa Cruz.
- Cooper, G. and Cowan, D., 2003, The application of fractional calculus to potential field data, *Exploration geophysics*, 34 (1/2), 51-56.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase, *Computers and Geosciences*, 32 (10), 1585-1591.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2009, Terracing potential field data, *Geophysical Prospecting*, 57 (6), 1067-1071.
- Fedi, M. and Florio, G., 2001, Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method, *Geophysical prospecting*, 49 (1), 40-58.
- Fedi, M., Ferranti, L., Florio, G., Giori, I. and Italiano, F., 2005, Understanding the structural setting in the Southern Apennines (Italy): insight from Gravity Gradient Tensor, *Tectonophysics*, 397 (1-2), 21-36.
- Grauch, V.J.S. and Cordell, L., 1987, Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudo gravity data, *Geophysics*, 52 (1), 118-121.



Shahrood University of Technology



Edge detection of subsurface structures using curvature gradient tensor of magnetic data

Mohammad Rezaie

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 7 May 2018; Accepted: 27 July 2018

Corresponding author: mohamad1rezaie@gmail.com

Keywords

Magnetic Method
Edge Detection
Gradient Tensor
Tilt Angle
Subsurface Structure
Qahan
Porphyry Copper

Extended Abstract

Summary

Edge detection of subsurface structures is an important objective in interpretation of magnetic data. In this paper, curvature gradient tensor (CGT) of magnetic data has been used along with tilt angle method to detect edges of subsurface structures. Application of these methods on synthetic and real gravity data has shown that the CGT of magnetic data, compared to the tilt angle method, can determine the edges of subsurface structures better.

Introduction

The main objective of the interpretation of magnetic data is to extract information about subsurface structures. Edge detection is an important means to image the edges of subsurface structures. Therefore, edge detection has traditionally been an important objective in the interpretation of magnetic data. There are various methods for edge detection. Tilt angle method is a traditional method that can detect edges of subsurface structures quantitatively. The value of Tilt angle is zero above the edges of subsurface bodies. The curvature gravity gradient tensor (CGGT) has also been used to interpret subsurface geological structures quantitatively. The eigenvalues of CGGT are zero above edges of subsurface bodies. In this paper, the CGT of magnetic data has been used for edge detection of subsurface magnetic bodies. The results of using the CGT of magnetic data have been compared with the results obtained from applying Tilt angle method on the data.

Methodology and Approaches

In order to obtain the CGT of magnetic data, at first, the magnetic data are reduced to pole (RTP). Then, horizontal vector gradients of the gradient tensors are computed from the RTP data using a Fourier transform technique. Then, the eigenvalues of the CGT of magnetic data are obtained. The small eigenvalue can only be used to detect the edges of bodies with positive susceptibility contrast, and the large eigenvalue can only be used to determine the edges of bodies with negative susceptibility contrast. As an example, chromite ore has positive density contrast with the host rock and produce positive gravity anomaly. Finally, the tilt angle method is also applied to compare its results with those of the CGT of magnetic data.

Results and Conclusions

The robustness of the method used for the enhancement of edge detection is tested with a magnetic anomaly map caused by two prisms of synthetic bodies with positive and negative susceptibility contrast. The results have shown that the zero contour of the small eigenvalue of the CGT of magnetic data compared to the zero contour of the tilt angle method can better detect the edges of synthetic bodies with positive susceptibility contrast. Moreover, the zero contour of the large eigenvalue of the CGT of magnetic data compared to the zero contour of the tilt angle method can better detect the edges of synthetic bodies with negative susceptibility contrast. The Tilt angle method is also more sensitive to noise than the CGT of magnetic data. The CGT method has been applied to real magnetic data from Qahan porphyry copper deposit in Markazi Province, Iran. The results have indicated that the large eigenvalue of the CGT can determine the edges of porphyry deposit and the small eigenvalue can outline positive magnetic anomalies caused by propylitic alteration. However, the tilt angle method has not been capable of finding the edges of the porphyry deposit.