

استفاده از روش نسبت گرادیان (Ratio) در تفسیر آنومالی‌های دوبعدی مغناطیسی دایک

کمال علمدار^{۱*} و مصطفی گلابی^۲

۱- استادیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: kamal.alamdar@gmail.com

واژگان کلیدی

چکیده

برآورد عمق و موقعیت افقی توده‌های مغناطیسی (پارامترهای موقعیتی توده) در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی بسیار مهم است. در این زمینه روش‌های متعددی توسط نویسندگان مختلف معرفی و مورد استفاده قرار گرفته است. اکثر این روش‌ها به نوع و هندسه مدل زیرسطحی مولد بی‌هنجاری وابسته هستند. بدین معنی که در رابطه تخمین عمق نهایی، پارامتری به نام شاخص ساختاری وجود دارد که بیانگر هندسه توده است و قبل از حل معادله باید مقدار آن جایگزین گردد در اکثر موارد اطلاع دقیقی از هندسه توده زیرسطحی در دسترس نیست و همین باعث بروز خطا در محاسبات خواهد شد. مدل دایک در اکتشاف معدن و زمین‌شناسی برای مدل‌سازی گسل و ساختارهای زمین‌شناسی که ضخامت آن‌ها در مقایسه با طولشان بیشتر است مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این مدل این است که منحنی گرادیان افقی و قائم میدان مغناطیسی حاصل از آن، دقیقاً روی مرز و لبه‌های توده تغییر می‌کند. در این مقاله با استفاده از نسبت بین گرادیان افقی و قائم توده دایک، رابطه‌ای برای تخمین عمق و موقعیت افقی آن ارائه شده است. در این مقاله گرادیان افقی داده‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود و مشتق قائم با استفاده از تبدیل هیلبرت محاسبه شده است. این روش روی داده‌های دایک مصنوعی در حالت‌های مختلف و همچنین داده‌های مغناطیس واقعی محدوده‌ای در شهرستان سیرجان به کار برده شده است. نتایج حاصل از این روش با استفاده از گمانه‌های حفاری موجود در محدوده اعتبارسنجی شده است.

عمق
مدل وابسته
اکتشاف معدن
گسل
دایک
نسبت گرادیان

۱- مقدمه

روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار به طور گسترده در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این زمینه روش‌هایی چون وررر دیکانولوشن (هارتمن و همکاران، ۱۹۷۱)، SLUTH (Source Location Using Total Homogeneity) (تورستون و اسمیت، ۲۰۰۷) و روش‌های تبدیل موجک (سایلهک و گیرت، ۲۰۰۳) را می‌توان نام برد. روش اوپلر دیکانولوشن (تامسون، ۱۹۸۲؛ ریث و همکاران، ۱۹۹۰) نیز از روش‌های خودکار به شمار می‌آید که در حال حاضر کاربرد گسترده‌تری دارد. سالم و همکاران (۲۰۰۷) روش عمق-تیل (Depth-Tilt) را برای تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از کنتاکت معرفی کردند. میلر و سینگ (۱۹۹۴) زاویه تیل را به عنوان روشی برای تفسیر داده‌های میدان پتانسیل توسعه دادند. زاویه تیل، T مربوط به میدان پتانسیل f از رابطه زیر نتیجه می‌شود:

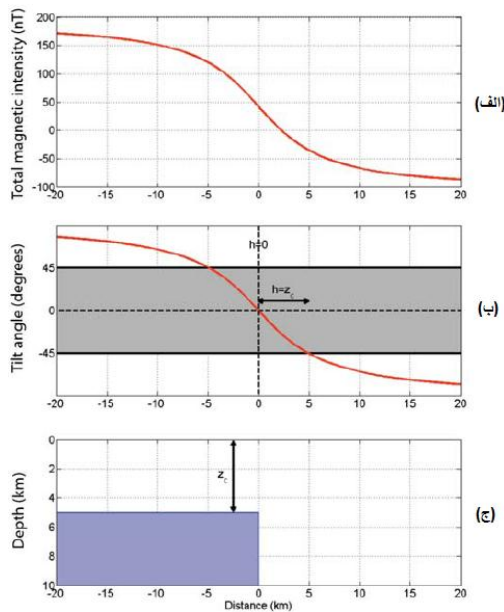
$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial f / \partial z}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}} \right) \quad (1)$$

در مورد توده کنتاکت با فرض اینکه شیب توده و همچنین شیب مغناطیس شدگی آن قائم است، با جایگذاری روابط مربوط به گرادیان‌های افقی و قائم مربوط به آن در رابطه زاویه تیل به رابطه نهایی زیر خواهیم رسید:

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{h}{z_c} \right) \quad (2)$$

که در آن h و z_c به ترتیب فاصله افقی و عمق تا توده کنتاکت است. پارامترهای h و z_c در شکل ۱ ارائه شده است. شکل ۱، الف نمودار پاسخ مغناطیسی کنتاکت و شکل ۱، ب نمودار زاویه تیل داده‌های قسمت الف را نشان می‌دهد. مقادیر زاویه تیل بین ۹۰+ تا ۹۰- درجه متغیر است. طبق این رابطه بالای لبه کنتاکت جایی که $h=0$ است مقدار زاویه نیل صفر و در مواردی که زاویه تیل ۴۵+ و ۴۵- درجه است به ترتیب عمق توده برابر $h=z_c$ و $h=-z_c$ است. شکل ۱، ج مقطع دوبعدی توده کنتاکت مورد بحث را نشان می‌دهد.

سالم و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که عمق تا بالای توده کنتاکت می‌تواند از طریق اندازه‌گیری نصف فاصله افقی بین خط کنترل زاویه تیل با ارزش ± 45 درجه تعیین شود. در مواردی که مغناطیس شدگی کنتاکت قائم نیست می‌توان از تکنیک تبدیل به قطب استفاده کرد (فرهد و همکاران، ۲۰۰۸a، ۲۰۰۸b؛ فرهد و ویلیامز، ۲۰۰۶). بعداً این روش روی داده‌های گرانی‌سنجی در حالت دو سه‌بعدی توسعه داده شد (کوپر، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱). همچنین روش تیل-عمق توسعه یافته که از کمیت عدد موج داده‌ها استفاده می‌کند نیز توسط سالم و همکاران (۲۰۱۰) ارائه شده است.



شکل ۱: نمایش فاصله افقی و عمق تا توده کنتاکت. (الف) نمودار پاسخ مغناطیسی کنتاکت. (ب) نمودار زاویه تیل داده‌های قسمت الف. (ج) مقطع دوبعدی توده کنتاکت.

۲- توسعه روش برای کاربرد روی داده‌های مغناطیس

سنجی دایک

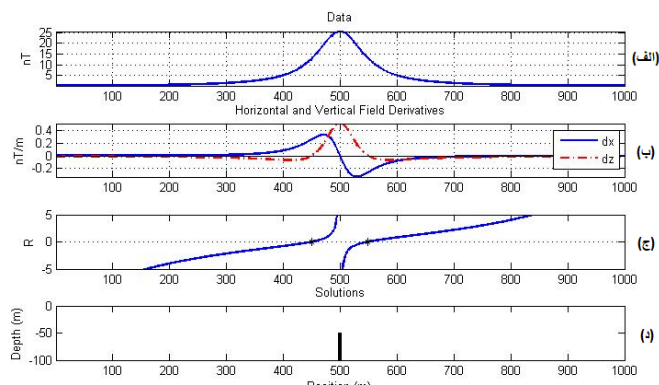
هدف از این تحقیق تعمیم و توسعه روش تیل-عمق است. تعمیم این روش از طریق کاربرد آن روی مدل‌های مغناطیس‌سنجی و توسعه روابط حاکم با استفاده از نسبت گرادیان‌های قائم و افقی داده‌های میدان پتانسیل است. گرادیان‌های افقی و قائم از پرکاربردترین فیلترها در زمینه پردازش و تفسیر کمی داده‌های مغناطیس‌سنجی محسوب می‌شوند. مزیت اصلی این دو فیلتر تغییر علامت و مقدار آن‌ها در لبه‌ها و مرزهای توده سبب شونده است. با این وجود برجستگی نويز در مشتق قائم سبب محدود شدن کارایی آن می‌شود که استفاده از فیلترهای ادامه فراسو و پایین‌گذر می‌تواند این مشکل برطرف نماید. البته محاسبه مشتق قائم با استفاده از تبدیل هیلبرت مشتق افقی که در این مقاله از آن استفاده می‌شود جزء تکنیک‌های محاسباتی است که با استفاده از آن می‌توان پایداری خروجی فیلتر قائم را بهبود بخشید.

۱-۲ پاسخ مغناطیسی مدل دایک

آنومالی مغناطیسی کل ناشی از یک دایک با ضخامت کم از رابطه زیر نتیجه می‌شود (بک، ۱۹۸۱):

$$f = \frac{A(x \sin \beta - \Delta z \cos \beta)}{(\Delta x^2 + \Delta z^2)} \quad (3)$$

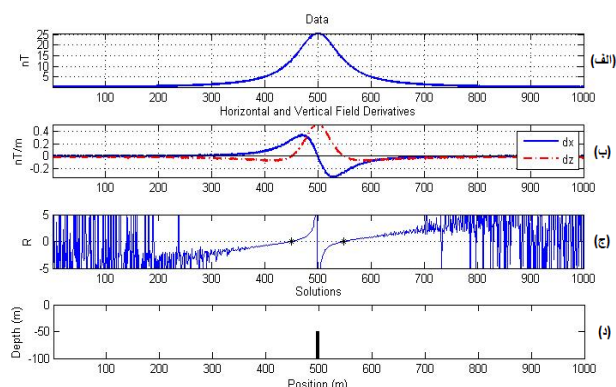
که در آن $\beta = 2I - \text{dip} - 90^\circ$ ، $\tan I = \tan i / \cos \alpha$ ، $A = 2kF_c w$ ، k خودپذیری زاویه میل بردار مغناطیس زمین،



شکل ۲: تخمین عمق دایک توسط روش نسبت مشتقات (R). (الف) منحنی پاسخ مغناطیسی دایک در عمق ۵۰ متر. (ب) نمودار مشتق داده‌ها در جهت قائم و افقی. (ج) نمودار نسبت مشتقات قائم به افقی (R) که از رابطه (۶) به دست می‌آید. (د) تخمین عمق دایک مدل سازی شده با استفاده از روش ارائه شده.

۲-۲- بررسی اثر نویز مصنوعی بر نتایج

مدل دوم دایک قائم در موقعیت افقی ۵۰۰ متر از ابتدای پروفیل و عمق ۵۰ متری نسبت به سطح زمین قرار دارد. زاویه میل و انحراف مغناطیسی میدان به ترتیب ۹۰ و ۰ درجه انتخاب شده است. داده‌ها توسط نویز مصنوعی با توزیع نرمال معادل ۱۰ درصد داده‌ها آغشته شدند. شکل ۳، الف منحنی پاسخ مغناطیسی دایک را نشان می‌دهد. در شکل ۳، ب منحنی‌های گرادیان افقی و قائم داده‌ها نشان داده شده است. در شکل ۳، ج منحنی تغییرات نسبت R ارائه شده است. شکل ۳، د نتایج تخمین عمق و موقعیت افقی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تخمین عمق دایک توسط روش نسبت مشتقات (R). (الف) نمودار مغناطیسی داده‌های مدل سازی شده اولیه در محیطی با ۱۰ درصد نویز. (ب) نمودار مشتق قائم و افقی داده‌های نویزی قسمت الف. (ج) نمودار نسبت مشتقات قائم به افقی (R) که از رابطه (۶) به دست می‌آید. (د) تخمین عمق دایک مدل سازی شده با استفاده از روش ارائه شده.

همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، پس از تخمین عمق با استفاده از روش ارائه شده، عمق دایک ۴۹/۲ متر نسبت به سطح زمین و موقعیت افقی آن ۴۹۹/۵ متر نسبت به ابتدای پروفیل برآورد

مغناطیسی، w عرض دایک، F شدت میدان مغناطیسی زمین شمال است. مشتق افقی و قائم رابطه (۳) برابر است با:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{A((z^2 - x^2)\sin\beta + 2xz\cos\beta)}{(x^2 + z^2)^2} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = -\frac{A((x^2 - z^2)\cos\beta + 2xz\sin\beta)}{(x^2 + z^2)^2} \quad (۵)$$

بنابراین نسبت بین مشتق‌ها از رابطه زیر نتیجه خواهد شد:

$$R = -\frac{((x^2 - z^2)\cos\beta + 2xz\sin\beta)}{((z^2 - x^2)\sin\beta + 2xz\cos\beta)} \quad (۶)$$

در رابطه فوق اگر مغناطیس شدگی و شیب توده قائم انتخاب شود، به ازای $x=\pm z$ مقدار $R=0$ خواهد بود. اگر مقدار شیب ۴۵ درجه و یا ۱۳۵ درجه انتخاب شود آنگاه به ازای $x=\pm z$ مقدار R به ترتیب ۱ و -۱ می‌شود. به علاوه اینکه اگر مقدار پارامتر $\alpha = 90^\circ$ آنگاه به ازای هر مقدار زاویه میل بردار مغناطیسی و شیب قائم توده به ازای $x=\pm z$ مقدار $R=0$ خواهد بود.

هدف از این مقاله کاربرد روش تخمین عمق با استفاده از نسبت مشتق‌ها (رابطه ۶) روی داده‌های مصنوعی مدل دایک و همچنین داده‌های واقعی مغناطیس‌سنجی زمینی مربوط به معدن سنگ آهن خیرآباد در شهرستان سیرجان استان کرمان است. پاسخ مغناطیسی دایک توسط برنامه کامپیوتری تهیه شده در محیط متلب تولید شده است.

اولین مدل دایک قائمی در موقعیت ۵۰۰ متر از ابتدای پروفیل و عمق ۵۰ متری نسبت به سطح زمین است. شدت میدان مغناطیسی ۴۶۰۰۰ نانو تسلا و زاویه میل و انحراف آن به ترتیب ۹۰ و ۰ درجه انتخاب شده است. شکل ۲ کاربرد روش پیش گفته شده را روی داده‌های مصنوعی این مدل نشان می‌دهد. تخمین عمق دایک توسط روش نسبت مشتقات (R) و با استفاده از رابطه (۶) انجام می‌گیرد. در این رابطه تمامی پارامترها معلوم و فقط عمق توده مجهول است. شکل ۲، الف منحنی پاسخ مغناطیسی دایک را نشان می‌دهد. در شکل ۲، ب منحنی‌های گرادیان افقی و قائم داده‌ها نشان داده شده است. در شکل ۲، ج منحنی تغییرات نسبت R ارائه شده است. شکل ۲، د نتایج تخمین عمق و موقعیت افقی توده را نشان می‌دهد نتایج تخمین عمق و موقعیت دایک با استفاده از این روش به ترتیب ۴۹/۷ و ۵۰۰ متر است. در نتیجه تعیین موقعیت افقی این مدل بدون خطا و تخمین عمق آن، دارای خطای در حدود ۰/۶٪ است.

تخمین عمق توده در این روش علاوه بر عواملی همچون زاویه میل و انحراف مغناطیسی میدان، به مقدار نویز موجود در منطقه همبستگی دارد که در مدل‌هایی بعدی سعی شده است تأثیر این پارامتر بر روی تخمین عمق توده‌ها بررسی شود و مقدار خطایی که این پارامتر ایجاد می‌کند، مورد بررسی قرار گیرد. البته در این روش چون از مشتق مرتبه اول داده‌ها استفاده می‌شود حساسیت آن به نویز حداقل است.

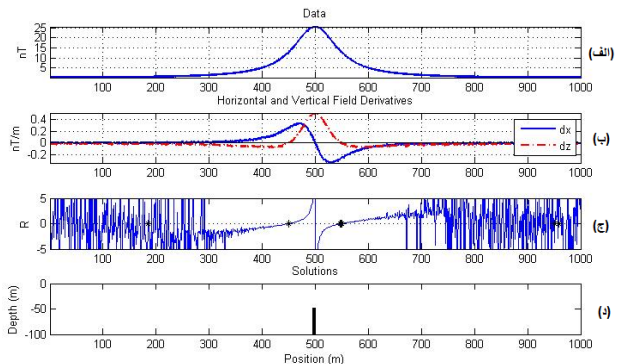
توده‌ها استفاده می‌کنند بر این فرض استوار هستند که زاویه میل مغناطیس شدگی توده ۹۰ درجه است و یا اینکه از داده‌های تبدیل به قطب به عنوان ورودی روش‌ها استفاده خواهد شد. در این قسمت تأثیر زاویه میل بر نتایج تخمین عمق توده دایک بررسی می‌شود.

در شکل ۵ دو دایک قائم در عمق‌های ۲۵ و ۵۰ متری نسبت به سطح زمین و در موقعیت‌های ۳۰۰ و ۷۰۰ متری از ابتدای پروفیل قرار دارند. این دو توده به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند. شدت میدان مغناطیس القایی ۴۶۰۰۰ نانو تسلا و زاویه میل و انحراف آن به ترتیب ۹۰ و ۵ درجه انتخاب شده است. شکل ۵، الف نمودار مغناطیسی داده‌های مدل‌سازی شده اولیه در محیطی بدون نویز را نشان می‌دهد. در شکل ۵، ب منحنی گرادیان افقی و قائم داده‌ها ارائه شده است. مشتق قائم داده‌ها توسط تبدیل هیلبرت مشتق افقی محاسبه شده است. در شکل ۵، ج نمودار نسبت مشتق‌های قائم و افقی (کمیت R) آمده است. شکل ۵، د نتایج تخمین عمق توده‌های دایک با استفاده از روش ارائه شده را نشان می‌دهد. روش ارائه شده موقعیت افقی و عمق توده دایک ۱ را به ترتیب ۳۰۰ و ۲۴/۴ متر برآورد می‌کند که بدین ترتیب در مقایسه با مقادیر حقیقی (۳۰۰ و ۲۵) میزان خطای روش در تخمین عمق دایک ۱ ۱/۷٪ تعیین می‌شود. همچنین این روش موقعیت افقی و عمق دایک ۲ را به ترتیب ۶۹۹/۸۲ و ۴۶/۳۸ متر برآورد می‌کند که در مقایسه با مقادیر حقیقی به کار رفته در مدل (۷۰۰ و ۵۰) مقدار خطای موقعیت افقی و عمق به ترتیب ۰/۱٪ و ۵/۱۴٪ است. چون دایک ۲ در عمق بیشتری نسبت به دایک ۱ قرار دارد خطای تخمین عمق و موقعیت افقی آن بیشتر است. درصد خطای ایجاد شده در تخمین عمق و موقعیت دایک‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

در مثال بعد دو دایک مغناطیسی مثال قبل، با شیب ۴۵ درجه در نظر گرفته شده و موقعیت افقی و عمق آن‌ها با استفاده از روش نسبت مشتق‌های قائم و افقی برآورد می‌گردد. در شکل ۶ دو دایک مغناطیسی دارای شیب ۴۵ درجه و در عمق‌های ۲۵ و ۵۰ متری نسبت به سطح زمین و در موقعیت‌های ۳۰۰ و ۷۰۰ متری از ابتدای پروفیل قرار دارند که به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند. بقیه پارامترها شبیه مدل مثال قبل در نظر گرفته شده است. شکل ۶، الف نمودار مغناطیسی داده‌های مدل‌سازی شده اولیه در محیطی بدون نویز را نشان می‌دهد. در شکل ۶، ب نمودار مشتق داده‌ها در جهت قائم و افقی ترسیم شده است. در شکل ۶، ج نمودار نسبت گرادیان‌های قائم و افقی (کمیت R) آمده است. شکل ۶، د تخمین عمق دایک‌های مدل‌سازی شده با استفاده از روش ارائه شده را نشان می‌دهد. در جدول ۲ خطای ایجاد شده در شیب‌های ۰ و ۴۵ درجه آورده شده است.

می‌گردد. با توجه به پارامترهای اولیه مورد استفاده در تولید مدل، خطای این روش در تخمین عمق و موقعیت افقی توده به ترتیب ۱/۶ و ۰/۱ است.

شکل ۴ مربوط مدل دایک قائم در موقعیت اولیه ۵۰۰ متر و عمق ۵۰ متر نسبت به سطح زمین است که توسط نویز مصنوعی معادل ۲۵ درصد داده‌ها آلوده شده است. شکل ۴، الف منحنی پاسخ مغناطیسی دایک را نشان می‌دهد. در شکل ۴، ب منحنی گرادیان افقی و قائم داده‌ها نشان داده شده است. در شکل ۴، ج منحنی تغییرات نسبت R ارائه شده است. شکل ۴، د نتایج تخمین عمق و موقعیت افقی را نشان می‌دهد. در این مثال عمق و موقعیت افقی توده به ترتیب برابر ۴۸/۲۷ و ۴۹۹ متر برآورد می‌گردد. در این حالت خطای تخمین عمق و موقعیت افقی توده به ترتیب برابر ۳/۴ و ۰/۲ درصد محاسبه شده است.



شکل ۴: تخمین عمق دایک توسط روش نسبت مشتقات (R). (الف) نمودار مغناطیسی داده‌های مدل‌سازی شده اولیه در محیطی با ۲۵ درصد نویز. (ب) نمودار مشتق داده‌ها در جهت قائم و افقی. (ج) نمودار نسبت مشتقات قائم به افقی (R) که از رابطه (۶) به دست می‌آید. (د) تخمین عمق دایک مدل‌سازی شده با استفاده از روش ارائه شده.

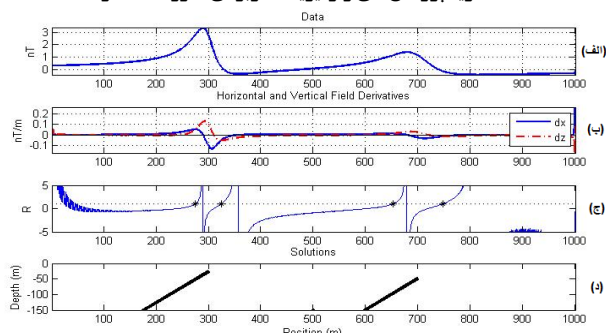
همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش نویز مقدار خطای تخمین روش ارائه شده افزایش می‌یابد. در جدول ۱ نتایج خطای تخمین عمق و موقعیت افقی را به ازای سطح نویزهای مختلف ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مقدار خطای ایجاد شده در داده‌های مغناطیسی آلوده

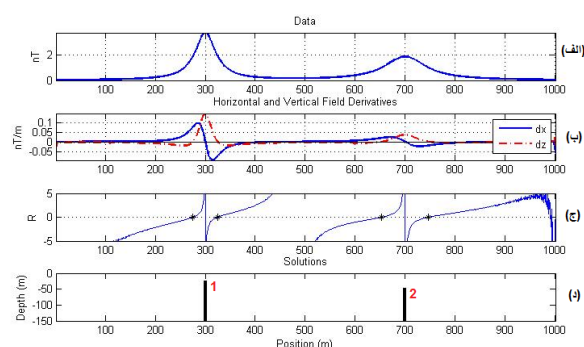
به مقادیر مختلف نویز مصنوعی.		
خطای عمق (%)	خطای موقعیت (%)	مقدار نویز (درصد داده‌ها)
۰/۶	۰	۰
۱/۶	۰/۱	۱۰
۳/۴	۰/۲	۲۵
۴/۶	۰/۴	۳۵

۲-۳- بررسی اثر تغییرات شیب و عمق دایک بر نتایج تخمین

یکی از پارامترهای مؤثر در شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زاویه میل بردار مغناطیس القایی است. روش‌هایی که برای تخمین عمق



شکل ۶: تخمین عمق دو دایک توسط روش نسبت مشتقات (R).
الف) نمودار مغناطیسی داده‌های مدل‌سازی شده اولیه در محیطی بدون نویز. ب) نمودار مشتق داده‌ها در جهت قائم و افقی. ج) نمودار نسبت مشتقات قائم به افقی (R) که از رابطه (۶) به دست می‌آید. د) تخمین عمق دایک‌های مدل‌سازی شده با استفاده از روش ارائه شده.



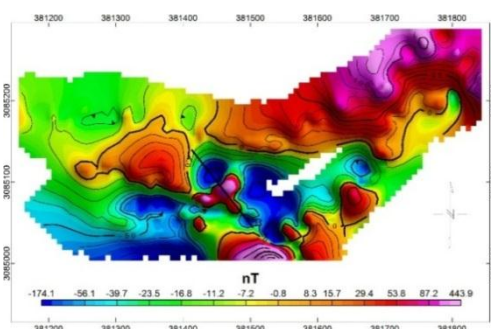
شکل ۵: تخمین عمق دو دایک توسط روش نسبت مشتقات (R).
الف) منحنی پاسخ مغناطیسی دو توده دایک در عمق‌های ۲۵ و ۴۰ متری. ب) نمودار مشتق داده‌ها در جهت قائم و افقی. ج) نمودار نسبت گرادیان‌های قائم به افقی (R) با استفاده از رابطه (۶). د) تخمین عمق دایک‌های مدل‌سازی شده با استفاده از روش ارائه شده.

جدول ۲: خطای ایجاد شده در تخمین عمق و موقعیت دایک‌ها در شیب‌های متفاوت.

شیب دایک	خطای عمق (%)		خطای موقعیت (%)	
	دایک (۱) ۲۵ متری	دایک (۲) ۵۰ متری	دایک (۱) ۲۵ متری	دایک (۲) ۵۰ متری
۹۰ درجه (قائم)	۱/۶۸	۶/۳۴	۰	۰/۰۲
۴۵ درجه	۰/۸۸	۵/۱۴	۰	۰/۰۱

همچنین توالی سنگ‌های کربناته (دولومیتی)، شیل و سنگ‌های آذرین (آندزیت) در مجاورت محدوده مورد بررسی به چشم می‌خورد. منطقه دارای گسل‌های زیادی است. کانی‌سازی آهن از نوع مگنتیت است که در برخی زون‌ها آغشته با هماتیت است.

برداشت‌های مغناطیسی در این منطقه توسط دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون و در ۱۶ پروفیل شمالی - جنوبی با فاصله متوسط ۲۵ متر انجام شده است. زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس زمین بر طبق مدل IGRF2013 به ترتیب برابر ۴۶ و ۳ درجه برآورد شده است. شکل ۷ نقشه مغناطیس زمینی تهیه شده از منطقه را نشان می‌دهد. به منظور تخمین عمق ماده معدنی در این محدوده پروفیلی عمود بر روند دوقطبی مغناطیسی مشاهده شده انتخاب و توسط روش ارائه شده در این مقاله برآورد عمق انجام شد.



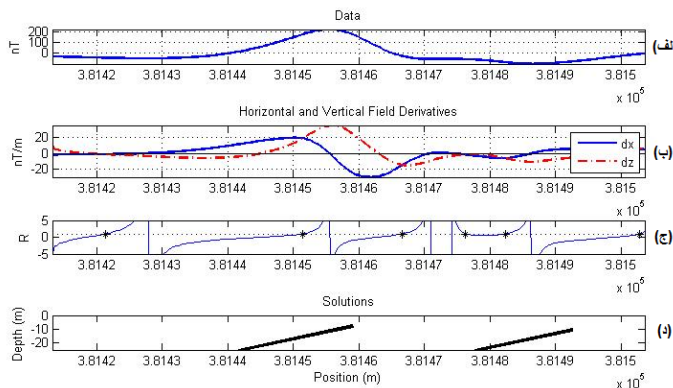
شکل ۷: نقشه مغناطیس زمینی تهیه شده از منطقه مورد بررسی در معدن سنگ آهن خیرآباد سیرجان.

با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که هنگامی که شیب دو توده از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه تغییر می‌کند، مقدار خطای تخمین عمق کمتر می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان در ضخامت کم دایک در نظر گرفت. هنگامی که توده دایک قائم است سطح مؤثر دایک در تخمین حداقل است اما وقتی شیب دایک ۴۵ درجه انتخاب شود سطح مؤثر بیشتری از دایک در تخمین شرکت می‌کند و به همین جهت تخمین عمق با دقت بیشتری انجام می‌گیرد. با این وجود چون معادله تخمین نسبت به موقعیت افقی (پارامتر X) خطی است لذا شیب دایک تأثیر چندانی در تخمین موقعیت افقی دایک ندارد. با افزایش عمق دایک خطای تخمین عمق و تخمین موقعیت افقی افزایش می‌یابد.

۳- تخمین عمق بر روی داده‌های واقعی معدن سنگ آهن سیرجان

محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ نی‌ریز قرار گرفته است. برای دسترسی به محدوده مذکور از سیرجان به سمت خیرآباد رفته و پس از طی حدود ۸۰ کیلومتر به محدوده مورد نظر می‌رسیم. کانی‌سازی آهن مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی متعلق به زون سنندج - سیرجان است. این محدوده بیشتر در زیر پوشش آبرفت قرار دارد؛ اما در قسمت‌هایی از منطقه سنگ‌های دگرگونی از نوع شیست‌های سیلیسی شده و شیست‌های سبز دیده می‌شود. سنگ‌های گرانودیوریت و آندزیت نیز به طور محدود وجود دارد.

علمدار و گلابی، استفاده از روش نسبت گرادیان (Ratio) در تفسیر آنومالی‌های دوبعدی مغناطیسی دایک، صفحات ۵۹-۶۷.



شکل ۸: تخمین عمق توده روی پروفیل AB از نقشه مغناطیسی باقیمانده معدن سنگ آهن خیرآباد توسط روش نسبت گرادیان‌های (R). الف) پروفیل مغناطیسی سنجی در امتداد AB پس از تبدیل به قطب و ادامه فراسو در ارتفاع ۵ متر. ب) گرادیان‌های افقی و قائم داده‌های قسمت الف. ج) منحنی تغییرات کمیت R (نسبت مشتق قائم و افقی). د) نتایج تخمین عمق و موقعیت افقی.

شکل ۸ کاربرد روش ارائه شده را روی پروفیل AB از نقشه مغناطیسی منطقه نشان می‌دهد. شکل ۸، الف پروفیل مغناطیسی-سنجی در امتداد AB پس از تبدیل به قطب و ادامه فراسو در ارتفاع ۵ متر را نشان می‌دهد. ادامه فراسو برای حذف نویزهای سطحی استفاده شده است. وجود لایه‌های پلاسمی آهن و همچنین واریزه‌های متعدد مگنتیت ادامه فراسوی داده‌ها را قبل از پردازش ضروری می‌سازد. شکل ۸، ب گرادیان‌های افقی و قائم داده‌های قسمت الف را نشان می‌دهد. در شکل ۸، ج منحنی تغییرات کمیت R (نسبت مشتق قائم و افقی) آمده است. شکل ۸، د نتایج تخمین عمق و موقعیت افقی را نشان می‌دهد. به دلیل نویز طبیعی موجود در منطقه، تخمین‌ها می‌تواند با خطا همراه باشد. نتایج این روش وجود دو توده دایک را در موقعیت افقی ۳۸۱۴۵۸ و ۳۸۱۴۹۲ ارائه می‌کند. عمق متوسط توده توسط این روش ۱۴ متر است. در نقطه‌ای با مختصات $x=381458$ و $y=3265200$ حفاری مغزه‌گیری انجام شد که در عمق ۱۷/۵ متری به ماده معدنی برخورد کرد. لاگ حفاری مربوط به این گمانه در شکل ۹ آمده است.

Location Direction Drilling Contractor Logged By BH ID SCALE				KHEIR ABAD IRON MINE VERTICAL KAVOSH PAJOUH YAZD, CO. 1:200				Start Date Finish Date Elevation Coordinates (HQ) (NQ)				20.02.2013 20.02.2013 2032.14 x=381458;Y=3265200 115.77 m																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Depth (m)	Sample No.	Elevation	Lithology	LITHOLOGY	GEOLOGICAL DESCRIPTION	INTERVAL (m)			CORE RECOVERY		RQD		COMPONENTS (%)										Core Recovery %		RQD %																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
						FROM	TO	TOTAL	(m)	(%)	(m)	(%)	Fe	P	S	SiO2	CaO	Mn	Al2O3	TiO2	Fe/FeO	25	75	25	75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0				Skarned																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											</

شکل ۹: لاگ حفاری گمانه اکتشافی معدن سنگ آهن خیرآباد سیرجان.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای تخمین عمق و موقعیت افقی توده‌های زیرسطحی از نسبت بین مشتق قائم و افقی داده‌های مغناطیس سنجی استفاده شد. منبع معادل مورد استفاده مدل دایک با ضخامت کم است. چون روش مذکور از مشتق داده‌ها استفاده می‌کند نتایج آن به نویز حساس است. در نتیجه هر چقدر نویز محیط بیشتر باشد خطای تخمین عمق و موقعیت آن افزایش می‌یابد. برای بهبود کارایی مدل هنگام مواجه با نویزهای مصنوعی می‌توان از روش ادامه فراسو و یا ترکیب فیلترهای پایین‌گذر و ادامه فراسو استفاده کرد. همچنین خطای تخمین عمق و موقعیت توده به شیب و عمق قرارگیری آن نیز وابسته است. این روش بر روی داده‌های مغناطیس زمینی معدن سنگ‌آهن سیرجان به طور موفقیت‌آمیز اعمال شد و نتایج آن با حفاری مغزه‌گیری تأیید شد. عمق متوسط توده توسط این روش ۱۴ متر است. در نقطه‌ای با مختصات $x=381458$ و $y=3265200$ حفاری مغزه‌گیری انجام شد که در عمق ۱۷/۵ متری به ماده معدنی برخورد کرد. لاگ حفاری مربوط به این گمانه در مقاله موجود است.

۵- منابع

- Cooper, G.R.J., 2012, The semi-automatic interpretation of magnetic dyke anomalies, *Computers & Geosciences* 44, 95-99.
- Cooper, G.R.J., 2004, A semi-Automatic procedure for the interpretation of geophysical data, *Exploration Geophysics*, 35 (3), 180-185.
- Florio, G. and Fedi, M., 2006, Euler deconvolution of vertical profiles of potential field data, 76th SEG meeting, New Orleans, Louisiana, USA, Expanded Abstracts, 958-962.
- Fairhead, J.D., Salem, A., Williams, S.E., Bourne, A.J., Green, C.M. and Samson, E.M., 2008a, Mapping the structure and depth of sedimentary basins using the magnetic tilt-depth method, 70th EAGE meeting, Rome, Italy, Expanded Abstracts.
- Fairhead, J.D., Salem, A., Williams, S.E. and Samson, E.M., 2008b, Magnetic interpretation made easy, The tilt-depth-dip-K method, 78th SEG meeting, Las Vegas, Nevada, USA, Expanded Abstracts.
- Fairhead, J.D. and Williams, S.E., 2006, Evaluating normalized magnetic derivatives for structural mapping, 76th SEG meeting, New Orleans, Louisiana, USA, Expanded Abstracts.
- Hartman, R.R., Teskey, D.J. and Friedberg, J.L., 1971, A system for rapid digital aeromagnetic interpretation, *Geophysics*, 36, 891-918.
- Hood, P., 1965, Gradient measurements in aeromagnetic surveying, *Geophysics*, 30, 891-902.
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt- a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J. and Somerton, I.W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, *Geophysics*, 55, 80-91.
- Sailhac, P. and Gibert, D., 2003, Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform, two dimensional wavelets and multi polar approximations, *Journal of Geophysical Research* 1, 8, 22-62.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D. and Ravat, D., 2007, Tilt-depth method, a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives, *The Leading Edge*, 1502-1505.
- Salem, A., Williams, S., Samson, E., Fairhead, D., Smith, R., Ravat, D. and Blakely, R.J., 2010, Sedimentary basins reconnaissance using the magnetic tilt-depth method, *Exploration Geophysics*, 41, 198-209.
- Salem, A., Ravat, D., Smith, R. and Ushijima, K., 2005, interpretation of magnetic data using the Enhanced local wave number approach, *Geophysics*, 70, L7-L14.
- Thomson, D.T., 1982, Euldp, a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, 47 (1), 31-37.
- Thurston, J.B. and Smith, R.S. 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method, *Geophysics*, 62, 807-813.
- Thurston, J. and Smith, R., 2007, Source location using total-field homogeneity, introducing the SLUTH method for depth estimation, *The Leading Edge*, 1272-1276.



Using Gradient Ratio Method in Interpretation of 2-D Magnetic Dyke Anomalies

Kamal Alamdar^{1*} and Mostafa Golabi²

1- Assistant Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- M.Sc. Student, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 18 October 2015; Accepted: 11 February 2016

Corresponding author: kamal.alamdar@gmail.com

Keywords

Depth
Model -Dependent
Gradient Method
Fault
Dyke

Extended Abstract

Summary

In the 1970s, with the appearance of digital systems and the collection of large amounts of gravity and magnetic field data, a new era was started in developing interpretation techniques of potential field geophysical data. New automated inverse techniques were widely adopted for interpretation of gravity and magnetic profile data based on two-dimensional (2-D) models such as the thin

sheet, thick dike, geological contact, polygonal bodies and dike. The tilt angle (TA) and its horizontal derivative are termed alternatively in the literature as local phase and local wavenumber, respectively, as these methods are closely associated with analytical signal definition of a potential field anomaly. In this paper, we use derivative ratio method to estimate the depth and location of magnetic dyke anomalies. This method has been applied on synthetic magnetic data as well on real magnetic data from a mining region in Sirjan area.

Introduction

Tilt angle, a relatively newly defined attribute of potential field data, is becoming increasingly popular among geoscientists for interpreting potential field, especially, the magnetic data. The power of the tilt angle in delineating body edges and, especially, the linear structures from a high resolution magnetic anomaly image in the tilt angle domain has been demonstrated by Thurston and Smith (1997), Salem et al. (2007, 2005). They have explained that high resolution attained in a tilt angle image is mainly due to a high dynamic gain attributed by the natural property of the arctangent function, the value of which ranges between -90° and 90° .

A buried fault is a common geological structure of interest in many geophysical applications. Geophysical signature of the fault is often subtle in total magnetic intensity images, where TA, which is a derivative field, should be an important tool for interpretation. Both normal and reverse magnetic anomaly of a fault can be modeled using a dike model. One of the most important specifications of such models is the variation of the vertical and horizontal derivatives directly on top of the body. Estimation of the depth and horizontal location of the anomaly play an important role in magnetic data interpretation. There are varieties of methods which can be used for definition of anomalies. Many of these methods are model-dependent, namely the estimation equation is depends on individual geometrical models.

Methodology and Approaches

Dykes are thin sheet-like intrusions of igneous rock that can have lateral extents of up to several 100 km. They are often strongly magnetic, and as a result, are clearly visible in images of aeromagnetic data. Depending on the situation, detailed modeling may be necessary to determine their locations and dips, and this can be time-consuming. A semi-automatic method for the interpretation of magnetic dyke anomalies, based on ratios of the gradients of the anomaly, is presented in this paper. The method is applicable to dykes with dips of multiples of 45 degrees.

Results and Conclusions

1. The ratio between vertical and horizontal gradients of the magnetic anomaly related to dykes can be used to estimate depth and location of the subsurface bodies.
2. The problem of noise enhancement in the computation of the gradients can be solved via two approaches:
 - a. acquiring the vertical and horizontal gradients in the field by magnetic gradiometer or
 - b. calculating the vertical derivatives (amplifying noise more) by means of Hilbert transform. The Hilbert transform is more stable than fast Fourier transform (FFT) and the results are more consistent.
3. The method is applicable to thin dykes with dips of multiples of 45 degrees. Obviously, if any of the assumptions inherent in the method are invalid (i.e. the anomalies are not from thin dykes, the dip angle is not a multiple of 45

degrees or the magnetization vector is not vertical) then the results will be incorrect.

4. The sensitivity of the method to the dip of the dykes and to the departure of the geomagnetic field from the vertical has been investigated.

5. The method has been tested on synthetic magnetic data and on real magnetic data from Sirjan mining region.
