

توسعه روش نسبت گرادیان برای تخمین عمق تودههای زیرسطحی با استفاده از دادههای نقشه بیهنجاری گرانی باقیمانده

كمال علمدار

استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۳

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

واژگان کلیدی	چکیدہ
واژکان کلیدی باقیمانده نسبت گرادیان مشتق افقی کل الگوی دایرهای شواز	چکیده روش های تفسیری موجود در مورد ساختارهای با الگوی دایرهای عمدتاً محدود به تخمین مرز و حدود این تودهها است. برای ارائه روشی برای تخمین عمق این ساختارها همزمان با تخمین مرز آنها، میتوان از کمیتی به نام نسبت گرادیان استفاده نمود. نسبت گرادیان بین مشتق قائم و مشتق افقی کل دادههای گرانیسنجی نوشته میشود. با این کار معادله درجه ۲ بسط داده میشود؛ که با حل آن میتوان عمق الگوهای دایرهای را برآورد نمود. در این مقاله کره و استوانه قائم مدلهایی مصنوعی با الگوی دایرهای در نظر گرفته میشوند؛ که با حل معادله تخمین عمق مربوط به آنها به ترتیب عمق تا مرکز و عمق تا سطح بالایی توده برآورد خواهد شد. این روش روی دادههای گرانیسنجی مصنوعی و واقعی به کار برده شده است. دادههای گرانیسنجی واقعی مورد استفاده در این
	مقاله مربوط به معدن سنگآهن شواز در استان یزد است. روش مذکور متوسط عمق تا مراکز تودههای هماتیتی را در حدود ۳۱ متر تخمین زد.

علمدار، توسعه روش نسبت گرادیان برای تخمین عمق تودههای زیرسطحی با استفاده از دادههای نقشه بیهنجاری گرانی باقیمانده، صفحات ۱۳۱–۱۴۱. ۱- مقدمه

از دیدگاه مدلهای مفهومی (Conceptual model)، ساختارهای دایرهای در دادههای گرانیسنجی ممکن است ناشی از پایپهای کمبرلیتی یا ساختارهای ضربه ای متئوریتی باشند. همچنین برخی از باتولیتهای گرانیتی (که در برخی موارد از لحاظ کانه زایی هم بارور هستند) نیز با الگوهای دایره ای در سطح زمین ظاهر می شوند. تحلیل چنین ساختارهایی معمولاً با استفاده از مدل سازی معکوس انجام می شود. به عنوان مثال می توان آنها را با مدل های استوانه قائم و کره مدفون تقریب زد (شکل ۱). روش هایی که برای برجسته نمودن ساختارهای دایره ای از روی دادههای گرانی سنجی، مورد استفاده قرار می گیرند، شامل فیلتر سایه روشن (sun-shading) و آنالیز بافت است (کوپر، ۲۰۰۳؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۵). استفاده از تبدیل هاگ (Hough Transform) نیز به طور ترجیحی می تواند در تعیین ساختارهای دایره ای موجود در دادههای گرانی سنجی مفید واقع شود (کیم و همکاران، ۱۹۷۵). با این حال هیچ کدام از این روش ها قادر به تخمین عمق ساختارهای دایره ای دایره ای نیستند.



شکل ۱: تشریح مدلهای مفهومی و ریاضی در مورد دادههای گرانیسنجی. سمت چپ: مدلهای مفهومی حوضه رسوبی با چگالیهای مختلف در بالا و نفوذ گنبد نمکی در پایین. سمت راست: مدلهای ریاضی معادل پدیدههای سمت چپ که در ژئوفیزیک اکتشافی استفاده می شود.

در تفسیر دادههای گرانیسنجی تخمین همزمان موقعیت و عمق توده بسیار مهم است. استفاده از روشهای اویلر دیکانولوشن (تامسون، ۱۹۸۲؛ رئید و همکاران، ۱۹۹۰) و معکوسسازی دادههای صحرایی (عبدالرحمان و همکاران، ۲۰۰۱) برآورد همزمان عمق و موقعیت توده زیرسطحی را ممکن میسازد. سالم و همکاران موقعیت میدار تخمین عمق تودههای مغناطیسی روش تیلت-عمق را ارائه کردند. در این روش عبارت تحلیلی مربوط به گرادیانهای قائم و افقی میدان مغناطیسی ناشی از مدل کنتاکت قائم در رابطه زاویه تیلت (میلر و سینگ، ۱۹۹۴) جایگذاری میشود. در این روش نصف فاصله افقی بین خطوط تراز با ارزش 45

درجه برابر عمق تا بالای توده کنتاکت است. در این مقاله از پارامتر نسبت گرادیان برای تخمین عمق و مرز تودههای دایرهای استفاده خواهد شد. نسبت گرادیان بین مشتق افقی کل و مشتق قائم دادههای گرانی نوشته میشود؛ که کمیتی بدون بعد است و ماکزیمم آن در مرزهای توده قرار خواهد گرفت. این روش روی دادههای گرانی واقعی و مصنوعی (مدلهای استوانه قائم و کره) به کار برده خواهد شد.

۲-تئوری روش

همان طور که اشاره شد؛ در این مقاله برای مدل سازی ساختارهای دایرهای از مدل های استوانه قائم و کره مدفون استفاده شده است. به همین منظور در ادامه روابط تئوری حاکم بر مسئله مربوط به دو مدل ارائه شده است. عمق برآورده شده در مورد مدل کره عمق تا مرکز و در مورد استوانه قائم عمق تا سطح بالایی آن است. کد کامپیوتری به زبان متلب توسط نویسنده مقاله توسعه داده شده است؛ که دادههای گرانی مصنوعی مدل های کره و استوانه قائم را تولید و سپس در قسمت دیگر برنامه تخمین عمق آن صورت می گیرد. همچنین می توان دادههای گرانی سنجی واقعی را در این کد فراخوانی کرد و تخمین عمق توده زیر سطحی را انجام داد.

-۱-۲ توسعه روابط مربوط به مدل کره مدفون

مؤلفه قائم آنومالی گرانی (g_z) بالای مدل کره مدفون از رابطه زیر نتیجه میشود (تلفورد و دیگران، ۱۹۹۵):

$$g_{z} = \frac{Gmz}{\left(x^{2} + y^{2} + z^{2}\right)^{3/2}}.$$
 (1)

که در آن G ثابت جهانی گرانش، m جرم کره (اختلاف جرم کره با اطراف)، x به ترتیب مختصات شرقی-غربی و شمالی-جنوبی و z عمق کره است.

اگر گرادیانهای افقی و قائم رابطه فوق محاسبه شود؛ روابط زیر تولید میشوند (کوپر، ۲۰۱۲):

$$\frac{\partial g_z}{\partial x} = \frac{-3Gmzx}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}},\tag{(7)}$$

$$\frac{\partial g_z}{\partial y} = \frac{-3Gmzy}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}},\tag{(7)}$$

$$\frac{\partial g_z}{\partial z} = \frac{Gm(x^2 + y^2 - 2z^2)}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{5/2}},$$
(*)

یکی از فیلترهای مهم در تفسیر و پردازش دادههای میدان پتانسیل فیلتر مشتق افقی کل است که رابطه آن در زیر آمده است:

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2},\tag{(a)}$$

که در آن THDR مشتق افقی کل دادههای میدان پتانسیل و ۲ دادههای میدان پتانسیل است.

در مورد دادههای مؤلفه قائم میدان گرانی کره مدفون رابطه مشتق افقی کل به صورت زیر نوشته میشود:

$$THDR_{sphere} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_z}{\partial y}\right)^2} = \frac{3Gmzr}{\left(r^2 + z^2\right)^{5/2}}, \qquad (\pounds)$$

که در آن r فاصله افقی تا مرکز کره است. در این رابطه مشتق افقی با استفاده از تبدیل فوریه و در حوزه فرکانس محاسبه میشود. همچنین میتوان از روشهای محاسبه مشتق افقی در حوزه مکان نیز بهره جست. بدیهی است برای محاسبه مشتق قائم باید روشی را انتخاب نمود که کمترین حساسیت را به برجستگی نویز (ناپایداری خروجی) داشته باشد. به همین منظور از تبدیل هیلبرت برای محاسبه مشتق قائم استفاده شده است.

در این مقاله نسبت گرادیان (g_r) (Gradient Ratio) به صورت نسبت بین گرادیان قائم به مشتق افقی کل دادههای گرانی سنجی کره مدفون تعریف می شود که در رابطه (۲) آمده است (کوپر، ۲۰۱۲):

$$g_r = \frac{\frac{\partial g_z}{\partial z}}{THDR} = \frac{r^2 - 2z^2}{3rz} \Rightarrow r^2 - 2rz - 3rzg_r = 0 \tag{Y}$$

با حل معادله فوق میتوان عمق کره را برآورد نمود. معادله فوق دارای جوابی به صورت زیر است:

$$z_{\pm} = -\frac{3}{4}g_{r}r \pm \frac{r\sqrt{9g_{r}^{2} + 8}}{4}.$$
 (A)

۲-۲- استراتژی مورد استفاده برای حل معادله فوق

عنوان مثال $1 = g_r$) و سپس جستجو برای منحنیهای تراز دایرهای است. با این کار مقدار r از روی مختصات منحنیهای تراز به عنوان یک پارامتر معلوم تعیین خواهد شد. درنهایت میتوان عمق تا کره را از رابطه (۷) برآورد نمود. البته حل این معادله منجر به تعیین دو مقدار z + e برای عمق خواهد شد. بدیهی است که مقدار z + c در بالای سطح زمین قرار دارد و از آن صرفنظر میشود. مقدار عمق برآورد شده از این رابطه عمق تا مرکز کره است.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ۱۳۹۴.

یک روش ساده برای تعیین منحنیهای تراز دایرهای شکل محاسبه میزان گردشدگی (circularity) آنهاست. برای این منظور از معیار زیر استفاده میشود:

$$C = \frac{3\pi A}{p}.$$
(9)

که در آن A مساحت محاط شده به وسیله یک منحنی تراز و P محیط آن است. مقدار C برای دایره مساوی ۱ و برای دیگر اشکال هندسی کمتر از یک است (به عنوان مثال برای مربع ۷۹/۰ و برای مثلث متساویالاضلاع ۰/۰). در الگوریتم مورد استفاده برای تعیین ترازهای دایرهای، بعد از محاسبه معیار فوق، تنها ترازهایی با مقدار C بالاتر از مقدار حد آستانه (این مقدار توسط کاربر انتخاب میشود) به عنوان تراز دایرهای استفاده خواهند شد.

٣-٢- توسعه روابط مربوط به مدل استوانه قائم

مؤلفه قائم آنومالی گرانی بالای یک استوانه قائم مدفون با شعاع a، چگالی *p* و گسترش عمقی نامحدود از رابطه آتی نتیجه خواهد شد (بک، ۱۹۸۱):

$$g_{z} = \frac{\pi G \rho a^{2}}{\left(x^{2} + y^{2} + z^{2}\right)^{\frac{1}{2}}},$$
 (1.)

با این فرض که a >>> r گرادیانهای قائم و افقی مربوط به استوانه قائم از رابطه زیر نتیجه خواهد شد:

$$\frac{\partial g_z}{\partial x} = \frac{-\pi G \rho a^2 x}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{3/2}},\tag{11}$$

$$\frac{\partial g_{z}}{\partial y} = \frac{-\pi G \rho a^{2} y}{\left(x^{2} + y^{2} + z^{2}\right)^{3/2}},$$
(17)

$$\frac{\partial g_z}{\partial z} = \frac{-\pi G \rho a^2 z}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{3/2}},$$
(17)

بنابراین مقدار مشتق افقی کل مربوط به مدل استوانه قائم به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$THDR = \frac{\pi G \rho a^2 r}{\left(r^2 + z^2\right)^{3/2}}.$$
 (14)

که در آن r فاصله تا مرکز استوانه است. در نتیجه نسبت گرادیان g_r ، نسبت بین گرادیان قائم و مشتق افقی کل استوانه قائم به صورت زیر نتیجه خواهد شد:

$$g_r = \frac{\frac{\partial g_z}{\partial z}}{THDR} = -\frac{z}{r}.$$
 (10)

استراتژی مورد استفاده برای حل این معادله همانند مدل کره مدفون است؛ به عبارت دیگر هنگامی که منحنیهای تراز دایرهای مربوط به مدل استوانه قائم تعیین شدند (توسط معیار ارائه شده در علمدار، توسعه روش نسبت گرادیان برای تخمین عمق تودههای زیرسطحی با استفاده از دادههای نقشه بیهنجاری گرانی باقیمانده، صفحات ۱۳۱–۱۴۱.

رابطه (۹)) موقعیت و عمق توده برآورد خواهد شد. در این مورد عمق برآورد شده عمق تا قاعده بالایی استوانه خواهد بود.

۳- کاربرد روش روی دادههای گرانی مصنوعی

شکل ۲ کاربرد روش تخمین عمق پیش گفته شده را روی دادههای \mathcal{R} گرانی مصنوعی مدل کره نشان میدهد. مرکز کره در مختصات \mathcal{R} ۲۰۰۰ x=۲۰۰ و ۲۰۱۰ ترم دارد. اختلاف چگالی مدل با اطراف ۲۰/۰۱ گرم بر مترمکعب و شعاع آن ۱۰ متر فرض شده است. شکل ۲، الف نقشه دادههای گرانی مربوط به مدل را نشان میدهد. شکل ۲، ب نقشه تغییرات نسبت گرادیان دادهها (نسبت مشتق قائم شکل ۲، ب نقشه تغییرات نسبت گرادیان دادهها (نسبت مشتق قائم مشخص شده است. تخمین عمق تا مرکز کره با استفاده از مقادیر ۲ مشخص شده است. تره منخل مشخص است. بر این اساس عمق تا مرکز کره مدل ۱۰/۱ متر برآورد گردیده است.

مدل مصنوعی دوم از سه کره تشکیل شده که پارامترهای به کار رفته در تولید پاسخ گرانی آنها در جدول ۱ آمده است. شکل ۳،

الف نقشه دادههای گرانی مربوط به سه مدل کره را نشان میدهد. شکل ۳، ب نقشه تغییرات نسبت گرادیان (نسبت مشتق قائم به افقی) دادههای قسمت الف را نشان میدهد. منحنی تراز $g_r = 1$ در این شکل مشخص شده است. تخمین عمق تا مرکز کره با استفاده از مقادیر r در محدوده این منحنی تراز و از رابطه (۸) به دست آمده است و مقدار عددی آن روی شکل مشخص است. در نهایت عمقهای برآورد شده مربوط به هر مدل در جدول ۱ آمده است. در مدل مصنوعی سوم چهار توده استوانهای شکل در اعماق مختلف و با اختلاف چگالی یکسان در نظر گرفته شده است. پارامترهای به کار رفته در تولید پاسخ گرانی مدلهای استوانه در جدول ۲ آمده است. شکل ۴، الف نقشه داده گرانی سنجی مصنوعی مدل را نشان میدهد. در شکل ۴، ب نقشه تغییرات نسبت گرادیان (نسبت مشتق قائم به افقی) دادههای قسمت الف ارائه شده است. منحنی تراز در این شکل مشخص شده است. در تخمین عمق تا سطح $g_r = 1$ بالایی تودهها از رابطه (۱۵) استفاده شده است. عمقهای برآورد شده مربوط به هر مدل در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای فیزیکی مربوط به مدلهای مصنوعی متشکل از سه کره مدفون در اعماق مختلف.

عمق بر آورد شده	اختلاف چگالی (gr/cm ³)	عمق تا مرکز (z)	مختصات y (m)	مختصات x (m)	مدل
٨/١	١	٨	۱۰۰	٨٠	کره ۱
١٣	١	١٣	74.	13.	کره ۲
۲.	١	١٩	٨٠	۳۲.	کرہ ۳

جدول ۲: پارامترهای فیزیکی مربوط به مدلهای مصنوعی متشکل از چهار استوانه مدفون در اعماق مختلف.

عمق بر آورد شده	اختلاف چگالی (gr/cm ³)	عمق تا بالای استوانه (z)	مختصات y (m)	مختصات x (m)	مدل
۵/۱	١	۵	۵۰	۱	استوانه ۱
۱۷/۹	١	λ / Δ	١٣٠	۳۰۰	استوانه ۲
٣٧	١	۴.	۲۰۰	۲۰۰	استوانه ۳
۱۹/۳	١	۲۰	۳۵۰	٣٠	استوانه ۴



شکل ۲: کاربرد روش روی دادههای گرانی مدل کره. الف) نقشه پاسخ گرانی مدل کره. عمق تا مرکز کره ۱۰ متر است. ب) نقشه تغییرات نسبت گرادیان دادههای قسمت الف. در این شکل منحنی تراز $g_{\,r}=1$ مشخص شده است که در تخمین عمق کره مدفون استفاده شده است.



شکل ۳: کاربرد روش روی دادههای مصنوعی گرانیسنجی سه مدل کره. پارامترهای به کار رفته در تولید پاسخ گرانی مدل در جدول ۱ آمده است. الف) نقشه پاسخ گرانی مدلهای کروی. ب) نقشه تغییرات نسبت گرادیان دادههای قسمت الف. در این شکل منحنی تراز $g_r=1$ مشخص شده است که در تخمین عمق تودههای کروی مدفون استفاده شده است.



شکل ۴: کاربرد روش روی دادههای مصنوعی گرانی سنجی چهار مدل استوانه. پارامترهای به کار رفته در تولید پاسخ گرانی مدل در جدول ۲ آمده است. الف) نقشه پاسخ گرانی مدلهای استوانهای. ب) نقشه تغییرات نسبت گرادیان دادههای قسمت الف. در این شکل منحنی تراز ۲ مشخص شده است؛ که در تخمین عمق تودههای استوانه استفاده شده است. مقادیر عمق برآورد شده مربوط به هر توده در جدول ۲ آمده است.

۴- کاربرد روش روی دادههای گرانیسنجی معدن سنگآهن شواز یزد

به منظور بررسی کاربرد روش پیشگفته شده در این قسمت این روش روی دادههای گرانی سنجی، معدن سنگآهن شواز در جنوب غرب یزد به کار برده میشود.

محدوده مورد مطالعه در نقشه آباده با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ و در جنوب غرب روستای شواز قرار گرفته است. محدوده مورد بررسی در طول شرقی ۵۳ درجه و ۴۰ دقیقه و طول شمالی ۳۱ درجه و ۴۰ دقیقه قرار دارد.

شرح برونزدهای سنگی در محدوده مورد بررسی را میتوان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف) سنگهای گرانیتی

قدیمی ترین سنگهایی که در منطقه مورد مطالعه و اطراف آن دیده می شود سنگهای گرانیتی و گرانودیوریتی شیر کوه می باشند که در شرق منطقه مورد مطالعه واقع شده اند. سن این سنگهای گرانیتی را به قبل از کرتاسه نسبت می دهند. در منطقه مورد مطالعه، سنگهای نفوذی شیر کوه در وسعت زیادی مشاهده شده که دارای ترکیب گرانودیوریت تاگرانیت است. با توجه به مطالعات انجام گرفته به نظر می رسد که سنگهای نفوذی شیر کوه

علمدار، توسعه روش نسبت گرادیان برای تخمین عمق تودههای زیرسطحی با استفاده از دادههای نقشه بیهنجاری گرانی باقیمانده، صفحات ۱۳۱-۱۴۱.

با گرانودیوریتهای بیوتیتدار آغاز و سپس در مراحل بعدی دارای ترکیبات اسیدی شدهاند.

ب) سازند سنگستان

این سازند از سازندهای اصلی بشمار میرود که سطح بسیار زیادی را در محدوده کانسار شامل میشود. سنگشناسی این سازند از تناوب ماسهسنگ و کنگلومرای دانهریز، مارنهای قرمز رنگ با لایهبندی منظم همراه با میان لایههایی از آهک تشکیل شده است که گاه نفوذیهایی سیل مانند با ترکیب گابرو تا دیوریت آنها را همراهی مینماید.

در منطقه مورد مطالعه مرز زیرین این سازند به طور دگرشیب بر روی گرانیتهای شیرکوه قرار گرفته است. در مورد سن و زمان تشکیل این سازند اختلاف نظر وجود دارد. ولی بر اساس اسناد منتشر شده از سوی سازمان زمینشناسی کشور سن این سازند، کرتاسه زیرین قلمداد شده است.

ج) سازند تفت

بر روی رسوبات تخریبی کرتاسه زیرین در ناحیه یزد واحد آهکی- دولومیتی قرار دارد که این واحد روی نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ خضرآباد تحت عنوان سازند تفت معرفی گردیده است.

بر اساس مطالعه فسیلهای منطقه، سن این سازند را به کرتاسه نسبت دادهاند. آهکهای تفت با سنگآهک شیلی، سنگآهک نازک لایه تا میان لایه آغاز شده و به سمت بالاتر دارای لایهبندی ضخیم میشود به طوری که ارتفاعات بلند منطقه را به وجود آورده است. این آهکها دارای رنگ کرم بوده و گاه به صورت تناوبی از لایههای آهکی سیاهرنگ مشاهده میشوند. روی سنگآهک تفت تناوبی از سنگآهک و مارن به رنگ قهوهای تا قهوهای متمایل به زرد میپوشاند که دارای سن آلبین- سنومانین میباشند.

د) نهشتههای نئوژن

واحدهای میوسن دارای رخساره تخریبی و تبخیری بوده و نشان از یک حوضه کمعمق و پرتلاطم و در برخی نقاط نیز کولابی میدهد. حرکتهای انتهایی کوهزایی آلپ با چینخوردگی و فرسایش شدید همراه بوده که موجب تشکیل کنگلومرای پلیوسن شده است. این کنگلومرا از نظر سنی هم ارز کنگلومرای هزار دره در البرز و بختیاری در زاگرس است که با ناپیوستگی بر روی رسوبات میوسن قرار گرفته است.

ه) آميزه رنگين

در امتداد گسل دهشیر - بافت در شمال زرو مجموعه در همی از سنگهای اولترابازیک، رادیولاریت و آهک پلاژیک به صورت باریکهای در کنار این گسل دیده می شود. سنگهای اولترابازیک منطقه بیشتر دارای ترکیبات سرپانتینیت و گابروپگماتوئیدی هستند. بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی مقاطع نازک

آهکهای پلاژیک و فسیلهای موجود در آنها، سن این سنگها را به کرتاسه بالایی نسبت میدهند.

کانی سازی آهن شواز درون گسل نائین- دهشیر- بافت شکل گرفته است. محدوده مورد مطالعه جزئی از کفه طاقستان در یزد است. این محدوده بیشتر در زیر پوشش آبرفت قرار دارد؛ اما رخنمون سنگهای دیاباز، آندزیت در آن دیده میشود. سنگهای دگرگونی از نوع شیستهای سیلیسی شده و شیستهای سبز نیز وجود دارد. همچنین توالی سنگهای کربناته (دولومیتی)، شیل و سنگهای آذرین (آندزیت) در مجاورت محدوده مورد بررسی به چشم میخورد. کانیسازی آهن شامل هماتیت با درصد کمی (بسیار ناچیز) مگنتیت است که پیدایش آن اغلب در مرز تودههای آندزیتی با توفها قابل مشاهده است.

برداشت گرانی سنجی در معدن سنگ آهن شواز در ۶۵۰ ایستگاه و توسط گرانی سنجی سینتر کس CG5 انجام شده است. تمامی تصحیحات گرانی سنجی روی دادههای گرانی صحرایی اعمال شد تا دادههای تصحیح شده (آنومالی بوگر) حاصل شود. در مرحله بعد با استفاده از روش تحلیل روند سطحی آنومالی باقیمانده گرانی سنجی به دست آمد که در شکل ۵، الف نشان داده شده است.

در شکل ۵، ب نقشه نسبت گرادیان دادههای گرانی سنجی معدن شواز نشان داده شده است. در این شکل ساختارهای دایرهای و همچنین عمق برآورد شده توسط رابطه (۸) نیز نشان داده شده است. بر این اساس میانگین عمق توده هماتیتی در این منطقه حدود ۲۹/۵ متر برآورد شده است. شکل ۶ نقشه موقعیت گمانههای اکتشافی حفر شده در منطقه را نشان میدهد. در این محدوده در فاز اولیه حفاری و بر اساس نتایج ژئوفیزیک تعداد ۸ گمانه اکتشافی فاز اولیه حفاری و بر اساس نتایج ژئوفیزیک تعداد ۸ گمانه اکتشافی مفر شده است. گمانههای ۲ و ۵ به دلایل فنی تا عمق ۴۰ متری مجدد حفر گردید و تا عمق ۱۴۵ متری نیز ادامه یافت. جدول ۳ مشخصات گمانهها و عمق برخورد به ماده معدنی را نشان میدهد. میانگین عمق واقعی توده بر اساس نتایج این گمانهها ۳۱ متر است. در شکل ۷ لاگ زمینشناسی گمانه 1-HB ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات گمانههای حفر شده در معدن سنگ آهن شواز.

Х	У	عمق برخورد (متر)	ID
727102	3506867	31.5	BH-1
727553	3507046	31.75	BH-2
727550	3507046	28.5	BH-3
727357	3506948	29	BH-4
727107	3507068	23.5	BH-5
727120	3507080	40	BH-6
727740	3506615	34	Bh-7
727547	3507332	36	Bh-8



شکل ۵: کاربرد روش ارائه شده روی دادههای گرانی سنجی معدن سنگ آهن شواز استان یزد. الف) نقشه دادههای گرانی باقیمانده مربوط به محدوده مورد مطالعه. نتایج گرانیسنجی حدود تودههای هماتیتی را به خوبی مشخص کرده است. ب) نقشه نسبت گرادیان دادههای گرانی قسمت الف. در این شکل منحنیهای تراز دایرهای و همچنین مقادیر تخمین عمق نیز نشان داده شده است.



Lo Di Dr Lo Bł	ocation rection illing Co gged B H ID	ontrac Sy	tor	SHAVAZ IRON OF VERTICAL EGMPO BH-SI-02	RE													Star Finis Elev Coo (HQ	t Date sh Dat ation rdinate)	27.1: e 27.1 1953 es X:38	2.2011 2.2011 3.66 m 5701.6	2 Y:3	34326	76.97
	Ö	ц	Ŋ	1.200	GEOLOGICAL	IN ⁻	TERVAL	_ (m)	CC	RE	R	QD			CON	IPONE	ENTS	(%)	-7		Core	erv	RQD	%
Depth (m	Sample 1	Elevatio	Litholog	LITHOLOG	DESCRIBTION	FROM	то	TOTAL	(m)	<mark>(%)</mark>	(m)	(%)	Fe	FeO	S	Ρ	SiO2	CaO	Mn	Fe/FeO	% 25	75	25	75
0				Shale	low grade ore zone with country rock	0.00	3.00	3.00	2 80	93 33	0.30	10.00										Ţ.		Ť
3- 4- 5-				Shale	country rock partly crushed(shale, sandy shale to tuff) + quartz in bedding	3.00	6.00	3.00	2.70	90.00	0.59	19.75												
6 7 8						<mark>6.00</mark>	9.00	3.00	2.90	96.67	0.43	14.25										5		
10 11 12				sandy shale		9.00	12.00	3.00	2.90	96.67	0.67	22.18										ſ		
13 14 15						12.00	15.00	3.00	2.85	95.00	0.39	12.87												
16 17 18				sandy shale		15.00	18.00	3.00	2.90	96.67	0.78	25.86												
19 20 21 22	la contra de				medium grade iron ore with pyrite and quartz veinlets with boundary bedding.	18.00	21.00	3.00	2.70	90.00	0.81	27.16												
23 24 25						21.00	24.00	3.00	2.95	98.33	0.27	9.04												
26 27 28				Medium grade iron ore with high sulfide		24.00	27.00	3.00	2.85	95.00	0.88	29.24												
29 30 31				low grade iron ore with low		27.00	30.00	3.00	2.90	96.67	0.79	26.21												
32 33 34 35	a de constant d			Sunde	low to medium magnetite and fracturize in bedding with pyrite and limonite.	33.00	36.00	3.00	2.95	98.33	0.78	25.99											1	
36 37 38						36.00	39.00	3.00	2.95	98.33	0.89	29 <mark>.6</mark> 0												9
39 40 41			*	green metasomatite	country rock(chloritized meta shale, sandy shale to tuff)	39.00	41.00	2.00	1.95	97.50	1.10	55.13												
42 43 44				low grade iron ore with low sulfide		41.00 42.50	42.50 45.00	1.50 2.50	1.40 2.45	93.33 98.00	1.14 0.89	76.19 35.43										e e	,	
43 46 47 48						45.00	48.00	3.00	2.90	96.67	0.93	31.03										26	ſ	
49 50 51					low grade iron ore with pyrite, country rock rich and quartz ventete	48.00	51.00	3.00	2.95	98.33	0.85	28.25												
52 53 54					and quark veninets	51.00	54.00	3.00	2.80	93.33	0.68	22.62												
55 56 57 57			E	Shale	country rock with partly	54.00	57.00	3.00	2.85	95.00	0.68	22.57										ſ		
59 60 61				low grade iron	shale abd tuff) quartz in bedding zone	57.00	60.50	3.50	3.10	88.57	0.60	17.24												
62 63 64	an and an an and an			ore with low sulfide Serpentinized	row grade iron ore zone with country rock country rock(waste) serpentinized, partly	60.50 62.40	62.40 65.00	1.90 2.60	1.55 2.35	81.58 90.38	0.90 0.68	47.54 26.19										٦		

علمدار، توسعه روش نسبت گرادیان برای تخمین عمق تودههای زیرسطحی با استفاده از دادههای نقشه بیهنجاری گرانی باقیمانده، صفحات ۱۳۱–۱۴۲.

شکل ۷: لاگ زمینشناسی مربوط به گمانه BH-1.

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ۱۳۹۴.

- Cooper, G.R.J., 2003, Feature detection using sunshading, Computers & Geosciences, 29 (8), 941-948.
- Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2005, The use of textural analysis to locate features in geophysical data, Computers & Geosciences, 31 (7), 882-890.
- Cooper, G.R.J., 2012, A gradient-ratio method for the semiautomatic interpretation of gravity map data sets. Journal of geophysical prospecting, 60, 995-1000.
- Corner, B., 2003, Geophysical mapping of major structures of South Africa (poster), 8th SAGA Technical Meeting, Pilanesberg, South Africa, September.
- Kimme, C., Ballard, D.H. and Sklansky, J., 1975, Finding circles by an array of accumulators. C.A.C.M., 18, 120-122.
- 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.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Ravat, D. and Smith, R., 2007, Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives, The Leading Edge, December, 1502-1505.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1995, Applied Geophysics, 2nd edition, Cambridge University Press, NewYork, 770P.
- Thomson, D.T., 1982, Euldph: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data, Geophysics, 47 (1), 31-37.

۵- نتیجهگیری

تاکنون استفاده از نسبت گرادیان در تفسیر دادههای میدان پتانسیل به صورت نسبت بين مشتق قائم و افقى تعريف شده است. استفاده از نسبت گرادیان به صورت فوق تنها منجر به تخمین مرز توده خواهد شد. برای توسعه رابطهای برای تخمین عمق توده میتوان با استفاده از نسبت گرادیان کوپر (۲۰۱۲) از نسبت بین مشتق قائم و مشتق افقی کل استفاده کرد. در این روش معادلهای بر حسب r (یارامتر فاصله از نقطه مشاهدهای تا توده زیرسطحی) نوشته می شود كه؛ با حل آن مي توان عمق تودهها را بر آورد نمود. البته بايد توجه داشت که این روش به مدل وابسته است و برای تودههای با نرخ میرایی ۳ به ۲ (همان پارامتر شاخص ساختاری در معادله اویلر که در واقع توان r محسوب می شود) نوشته شده است. حساسیت این روش به نوفه نیز نسبت به دیگر روشهایی که از مشتق درجه بالا استفاده می کنند؛ به مراتب کمتر است. این روش روی دادههای گرانی مصنوعی مدل های استوانه قائم و کره با موفقیت به کار برده شده است. همچنین این روش روی دادههای گرانیسنجی زمینی مربوط به معدن سنگآهن شواز در استان یزد به کار برده شد. نتایج این روش متوسط عمق توده را در معدن مذکور ۳۱ متر برآورد می کند. نتایج این روش به وسیله اطلاعات گمانههای اکتشافی اعتبار سنجی شدہ است.

8- منابع

- Abdelrahman, E.M., El-Araby, H.M, El-Araby, T.M. and Abo-Ezz, E.R., 2001, Least-squares minimization approaches to depth, shape, and amplitude coefficient determination from gravity data, Geophysics 66, 1105-1109.
- Beck, A.E., 1981, Physical Principles of Exploration Methods, MacMillan press, London, 234P.



JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG) 2016, Vol 1, No 2 (DOI): 10.22044/JRAG.2015.658



Development of the gradient ratio method for depth estimation of the subsurface bodies using Bouguer gravity map data

Kamal Alamdar

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

Received: 31 May 2016; Accepted: 13 July 2016

Corresponding author: kamal.alamdar@gmail.com

Keywords	Extended Abstract
Bouguer	Summary
Gradient Ratio	The semi-automatic techniques play an important role in interpretation of
Total Horizontal Derivative	potential field data. There are many semi-automatic interpretation techniques
Circular Features	available for interpretation of gravity data, such as Werner deconvolution
Shavaz	(Hartman et al., 1971) and Euler deconvolution (Thompson, 1982; Reid et al.,
	1990). Some methods (Hsu et al., 1998; Keating and Pilkington, 2004; Salem,

2005) use the analytic signal amplitude. Other methods involve use of the gradient ratio of the potential field data and often give the edges of the bodies. In this paper, the gradient ratio method has been applied on gridded gravity map data for simultaneous estimation of the location and depth of the subsurface bodies. This method has been applied on synthetic gravity data as well on high resolution real gravity data acquired from Shavaz Iron Ore in southwest of Yazd province.

Introduction

Circular structures in gravity data may correspond to kimberlite pipes or to meteorite impact structures. They can be modelled in different ways such as inversion. The horizontal gradient of a potential field dataset in a given direction enhances linear features which trend at 90° to that direction, while diminishing those that lie parallel to that direction. Such directional derivatives are commonly applied to potential field data to enhance or diminish features such as dykes, faults, and trends. These derivatives are easily computed in the space or frequency domains. One of the filters, in which gradient ratio factor is used, is tilt angle (Miller and Singh 1994). Tilt angle is an attribute of potential field data and is becoming increasingly popular among geoscientists for interpreting potential field, especially, the magnetic data. Salem et al. (2007) obtained tilt angle by substituting the analytic expressions for horizontal and vertical derivatives of the magnetic field over a vertical contact. This paper generalizes this idea and applies it to gravity data related to vertical cylinder and buried sphere models.

Methodology and Approaches

The interpretation methods existed for circular features are restricted to edge detection only. This paper generalizes tilt-depth method for the magnetic vertical contact model to gravity data of vertical cylinder and buried sphere models. For simultaneous depth and edge estimation of such structures, we can use from gradient ratio method. The meaning of the gradient ratio is the ratio between vertical and horizontal derivatives. The method computes the ratio of the vertical derivative to the total horizontal derivative of data, and then, identifies circular contours within it. Having the radius of the contour and the contour value itself, we can determine the depth to the source. In this regard, a second order analytical equation is developed in which solving it leads to estimation of the depths of circular features. This method can be classified into model-dependent methods. In this paper, vertical cylinder and sphere have been used as synthetic models.

Results and Conclusions

The following results and conclusions can briefly be drawn from the study made in this paper:

1. The ratio between vertical and horizontal gradients of the gravity anomaly related to cylinders 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 the following two approaches:

- acquiring the vertical and horizontal gradients in the field by gravity gradiometer or

- calculating the vertical derivatives (more capable in noise amplifying) 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 has been tested on synthetic gravity data and on real gravity data from Shavaz Iron ore in southwest of

Yazd province.