

## تفسیر خودکار پروفیل‌های گرانی‌سنجی با استفاده از نسبت گرادیان داده‌ها

کمال علمدار<sup>۱</sup>، مصطفی گلابی<sup>۲</sup>، محمود شریعتمداری<sup>۳</sup>

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

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

۳- مربی، پردیس علوم، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

(دریافت: آذر ۱۳۹۳، پذیرش: اسفند ۱۳۹۴)

### چکیده

روش‌های تفسیر خودکار بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل به طور قابل ملاحظه‌ای سبب کاهش بار تفسیری ژئوفیزیک‌دانان می‌شوند و امروزه کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این روش‌ها به دو دسته کلی روش‌های مدلسازی و تحلیلی دسته بندی می‌شوند. از پرکاربردترین روش‌های تحلیلی می‌توان اویلر دیکانولوشن، ورنر دیکانولوشن و اخیراً روش تیلت - عمق (*Tilt-Depth*) را نام برد. روش تیلت - عمق بر پایه استفاده همزمان زاویه تیلت برای تخمین مرز و عمق توده‌های مولد است. در این تکنیک روابط گرادیان قائم و افقی بی‌هنجاری مغناطیسی مدل کنتاکت در رابطه مربوط به زاویه تیلت جایگذاری و رابطه ای برای تخمین عمق تولید می‌شود. در این مقاله این روش در مورد مدل‌های گرانی‌سنجی استوانه افقی و کره مدفون تعمیم و توسعه داده می‌شود. کارایی روش نیز با استفاده از مدل‌های مصنوعی کره و استوانه افقی در حالت‌های مختلف بررسی می‌شود. همچنین اثرات نویز و همجواری توده‌ها نیز بر کارایی روش بررسی شده است. این روش روی دو پروفیل تهیه شده از نقشه بی‌هنجاری گرانی معدن سنگ آهن شواز در استان یزد به کار برده شده و نتایج آن با روش تحلیل طیف انرژی مقایسه شده است.

### واژگان کلیدی

تیلت - عمق، کنتاکت، اویلر، تحلیل طیف انرژی، معدن سنگ آهن شواز

### ارجاع به این مقاله:

علمدار، ک.، گلابی، م.، شریعتمداری، م.، (۱۳۹۴). تفسیر خودکار پروفیل‌های گرانی‌سنجی با استفاده از نسبت گرادیان داده‌ها، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۵(۱۰)، ۱-۱۳.

## ۱- مقدمه

هدف از این مقاله تعمیم و توسعه روش تیلت - عمق است. تعمیم این روش از طریق کاربرد آن روی مدل‌های گرانی‌سنجی و توسعه آن بر مبنای استفاده از تمامی مقادیر نسبت گرادیان‌های داده‌های پتانسیل و نه یک مقدار خاص (بر خلاف روش تیلت - عمق) هست.

## ۲-۱- مدل استوانه افقی

بی‌هنجاری گرانی بالای یک استوانه افقی از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۱]:

$$g = \frac{-2fGa^2 \dots z}{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

که در آن  $a$  شعاع استوانه و ... اختلاف چگالی آن با اطراف است. گرادیان‌های افقی و قائم مرتبه اول مربوط به بی‌هنجاری گرانی رابطه (۳) به ترتیب در روابط زیر آمده است: [۱۲].

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{4fGa^2 \dots xz}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = -\frac{4fGa^2 \dots (x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2}, \quad (5)$$

نسبت گرادیان قائم به افقی بی‌هنجاری گرانی استوانه افقی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$r = -\frac{x^2 - z^2}{2xz}. \quad (6)$$

رابطه (۶) را می‌توان به صورت یک معادله دوجه دوم زیر بازنویسی کرد:

$$x^2 + 2xzc - z^2 = 0 \quad (7)$$

معادله ۷ دارای دو جواب تحلیلی به صورت زیر است:

$$x_1 = -rz + z\sqrt{(r^2 + 1)} \quad (8)$$

$$x_2 = -rz - z\sqrt{(r^2 + 1)}$$

اگر دو جواب تحلیلی رابطه (۸) از هم کم شوند، آنگاه می‌توان عمق توده را از رابطه زیر برآورد نمود:

$$z = \frac{x_1 - x_2}{2\sqrt{r^2 + 1}}. \quad (9)$$

از رابطه ۹ چنین استنباط می‌شود که اگر موقعیت دو نقطه  $x_1$  و  $x_2$  که دارای مقدار مشابهی از  $r$  هستند روی پروفیل گرانی‌سنجی مشخص شود، آنگاه عمق استوانه افقی از رابطه ۹ و به دنبال آن موقعیت استوانه از رابطه ۸ تعیین

روش‌های خودکار و نیمه خودکار به طور گسترده در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های خودکار تخمین مرز و عمق توده به طور همزمان صورت می‌گیرد اما در روش‌های نیمه خودکار، ابتدا با استفاده از یکی از روش‌های تخمین مرز، حدود توده تعیین و سپس روش‌های تخمین عمق روی نقاط مرزی مشخص شده، اعمال می‌شود تا برآوردی از عمق توده حاصل شود. در این زمینه روش‌هایی چون ورنر دیکانولوشن [۱]، *SLUTH* (Source Location Using Total Homogeneity) [۲] و روش‌های تبدیل موجک [۳] را می‌توان نام برد. روش اویلر دیکانولوشن [۴، ۵]؛ نیز از روش‌های خودکار به شمار می‌آید که در حال حاضر کاربرد گسترده‌تری دارد. سالم و همکاران (۲۰۰۷) [۶] روش عمق - تیلت (*Depth-Tilt*) را برای تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از کنتاکت معرفی نمودند. قبل از آن میلر و سینگ (۱۹۹۴) [۷] زاویه تیلت را به عنوان روشی برای پردازش تصاویر مشتق قائم داده‌های میدان پتانسیل توسعه دادند. زاویه تیلت،  $T$  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 تیلت به رابطه نهایی زیر حاصل می‌شود:

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

که در آن  $h$  و  $z_c$  به ترتیب فواصل افقی و قائم تا توده کنتاکت هستند. سالم و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که عمق تا بالای توده کنتاکت می‌تواند از طریق نصف فاصله افقی بین خط کنتور زاویه تیلت با ارزش  $\pm 45$  درجه تعیین شود. در مواردی که مغناطیس شدگی کنتاکت قائم نیست می‌توان از تکنیک تبدیل به قطب استفاده نمود [۸-۱۰].

## ۲- توسعه روش برای کاربرد روی داده‌های گرانی‌سنجی

$$r = \frac{(x^2 - 2z^2)}{3xz} \quad (13)$$

بازنویسی رابطه ۱۳ منجر به معادله چندجمله‌ای درجه دوم خواهد شد:

$$x^2 + 3xzr - 2z^2 = 0 \quad (14)$$

این معادله دارای دو جواب تحلیلی به صورت زیر است:

$$x_1 = -\frac{3}{2}rz - \frac{z\sqrt{(9r^2 + 8)}}{2} \quad (15)$$

$$x_2 = -\frac{3}{2}rz + \frac{z\sqrt{(9r^2 + 8)}}{2}$$

و در نهایت با ساده‌سازی روابط بالا می‌توان رابطه‌ای برای تخمین عمق توده کره ارائه کرد:

$$z = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{9r^2 + 8}} \quad (16)$$

استراتژی تخمین عمق نیز همانند استوانه افقی است. به عبارت دیگر برای هر مقدار  $r$ ، دو نقطه روی پروفیل مربوط به آن مشخص می‌شود. سپس عمق و موقعیت توده برآورد می‌شود [۱۴].

### ۳- داده‌های مصنوعی

به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده در این مقاله در این قسمت روش گفته شده در مقاله روی داده‌های گرانی مصنوعی مدل‌های استوانه افقی و کره مدفون به کار برده می‌شود.

در شکل ۱ مدل استوانه افقی با شعاع ۵۰ متر در عمق ۳۰ متری از سطح زمین قرار دارد. اختلاف چگالی این مدل با اطراف ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. شکل ۱، الف پاسخ گرانی مدل مذکور را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مرکز استوانه در موقعیت  $x=500$  متر قرار دارد که نقطه بیشینه مقدار گرانی مشاهده‌ای (۰/۱ میلی‌گال) است. طول پروفیل مورد استفاده در مدلسازی ۱۰۰۰ متر و فاصله نمونه‌برداری ۱ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۱، ب نمودار مقادیر  $r$  (نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌ها) را نشان می‌دهد. مقادیر  $r$  بین ۵ تا -۵ متغیر است. از روی نمودار  $r$  می‌توان مرکز مدل را تعیین نمود. شکل ۱، ج نتایج تخمین عمق مدل استوانه افقی را نشان می‌دهد که تجمع راه‌حل‌ها در نقطه  $x=500$  متر مشاهده می‌شود. در نتیجه این روش با

می‌شود. در نتیجه استراتژی حل مسئله جستجوی مقادیر مشابه از لحاظ مقدار  $r$  است. به عبارت دیگر برای هر مقدار روی پروفیل نسبت گرادیان  $r$ ، نقطه دیگری با مقدار یکسان  $r$  انتخاب می‌شود. به این دو نقطه، جفت داده ( $data\ pairs$ ) گفته می‌شود. اختلاف بین این دو جفت داده، فاصله یا جدایش آنها نام دارد. در عمل نقطه دوم بین دو مقدار مجاور  $r$  (نزدیک به هم) قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که این روش تنها روی آنومالی‌های منفرد (تک) یا ایزوله (دارای کمترین اثر هم‌پوشانی) کاربرد دارد. معمولاً توده‌های زیرسطحی به صورت منفرد (تک) و ایزوله (دارای کمترین اثر هم‌پوشانی) و دارای هم‌پوشانی تعریف می‌شوند. با توجه به الگوریتم روش فوق، این روش تنها روی توده‌های منفرد (تک) و یا توده‌های ایزوله کاربرد دارد. در قسمت مدلسازی مصنوعی کاربرد روش روی توده‌های منفرد، ایزوله و دارای هم‌پوشانی نشان داده خواهد شد. برای کاهش اثر نویز و همجواری توده‌های زیرسطحی، ابتدا یک بازه شامل حد کمینه و بیشینه فاصله (جدایش) جفت داده انتخاب می‌شود. سپس فقط جفت نقاطی که فاصله آنها بین مقادیر بیشینه و کمینه قرار انتخابی می‌گیرد، در محاسبات وارد می‌شوند. حد بیشینه بازه انتخابی باید تقریباً برابر عرض بی‌هنجاری باشد [۱۳].

### ۲-۲- مدل کره مدفون

روش تفسیری در مورد کره مدفون نیز دقیقاً مشابه استوانه افقی است. مؤلفه قائم بی‌هنجاری گرانی در نقطه‌ای در بالای مرکز کره مدفون با جرم  $m$  از رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$g = \frac{Gmz}{(x^2 + z^2)^{3/2}} \quad (10)$$

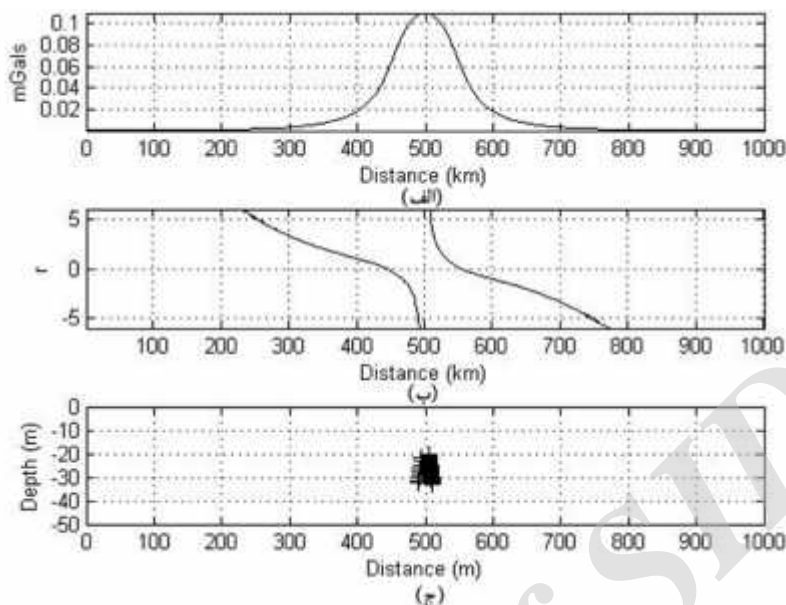
گرادیان‌های افقی وقائم مرتبه اول بی‌هنجاری گرانی کره به ترتیب از روابط زیر نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{-3Gmzx}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{Gm(x^2 - 2z^2)}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (12)$$

بنابراین نسبت گرادیان قائم به افقی بی‌هنجاری گرانی کره به صورت زیر نوشته می‌شود:

دقت بالایی موقعیت افقی و قائم مدل استوانه افقی را مشخص نموده است.



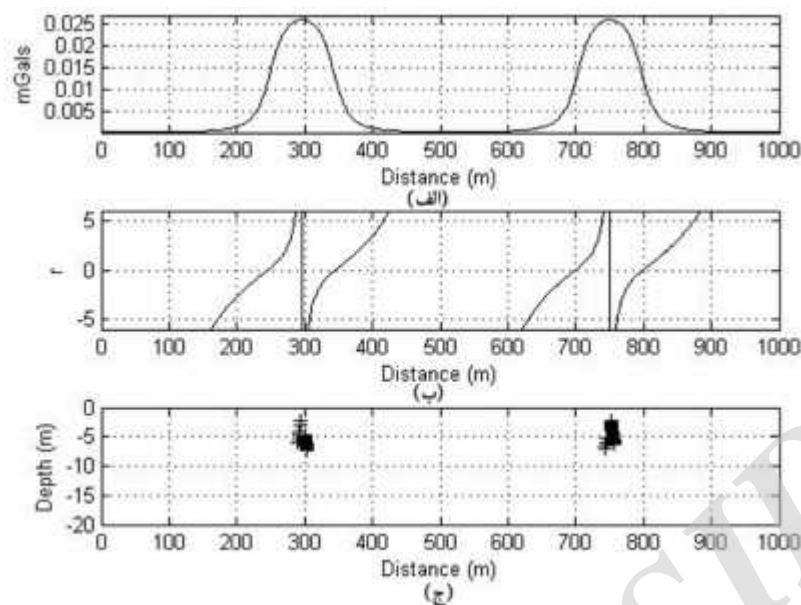
شکل ۱: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی مدل استوانه افقی در عمق ۳۰ متر (توده منفرد). الف) پاسخ گرانی مدل مذکور با اختلاف چگالی ۰/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. از روی این شکل می‌توان موقعیت افقی توده (مرکز توده) را تعیین نمود. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل تجمع راه‌حل‌های خروجی در موقعیت  $x=500$  متر منطبق بر مرکز توده مشاهده می‌شود. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.

هنوز حدود آنها قابل تشخیص است. شکل ۳، ب نمودار مقادیر  $r$  مربوط به گرادیان‌های دو توده را نشان می‌دهد. از روی این شکل می‌توان مراکز دو توده را تشخیص داد. نتایج تخمین عمق مربوط به مدل‌ها در شکل ۳، ج آمده است. از روی این شکل متوسط عمق توده ۵ متر برآورد می‌شود. با این وجود در مقایسه با شکل ۲، ج پراکندگی نتایج افزایش یافته که این می‌تواند به دلیل اثر همجواری توده‌ها باشد.

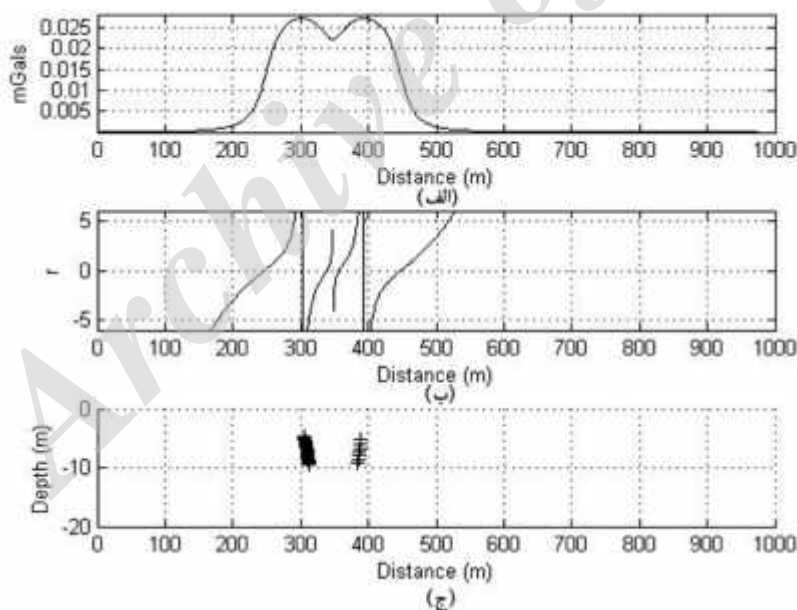
در شکل ۴ فاصله مراکز دو استوانه ۵ متر (برابر عمق آن‌ها) از یکدیگر انتخاب شد. شکل ۴، الف پاسخ گرانی این دو مدل را نشان می‌دهد. در این شکل محدوده‌های بیشینه دو توده کاملاً در هم ادغام شده است. شکل ۴، ب نمودار تغییرات  $r$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این شکل تنها حدود یک توده مشخص شده است که این به دلیل اثر همجواری توده‌ها است. شکل ۴، ج نتایج تخمین عمق را نشان می‌دهد که پراکندگی راه‌حل‌ها بسیار زیاد است. در ضمن مقادیر تخمین عمق نیز متوسط عمق توده‌ها حدود ۱۰ متر برآورد می‌کند با واقعیت متفاوت است.

در شکل ۲ دو استوانه افقی با شعاع‌های ۵۰ متر در اعماق ۵ متر از سطح زمین قرار دارد. اختلاف چگالی توده‌ها با اطراف ۰/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. طول پروفیل ۱۰۰۰ متر و فاصله نمونه‌برداری ۱ متر انتخاب شده است. میزان جدایش (فاصله) مراکز دو توده استوانه از یکدیگر ۴۵۰ متر است. شکل ۲، ب نمودار تغییرات  $r$  مربوط به این مدل‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت مراکز دو توده با دقت بالایی از روی نمودار  $r$  قابل تشخیص است. شکل ۲، ج نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان را نشان می‌دهد. در این شکل نیز تجمع خروجی‌های تخمین عمق منطبق بر موقعیت مراکز دو توده قرار دارد. از روی این شکل عمق توده نیز برابر ۵ متر برآورد می‌شود.

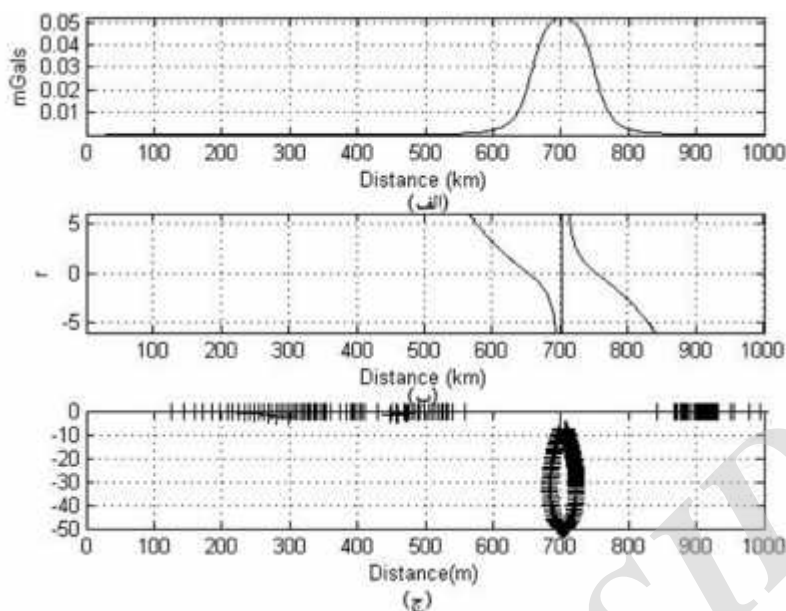
به منظور بررسی اثر همجواری توده‌ها بر کارایی روش، توده‌های استوانه افقی شکل ۲ در فاصله ۱۰۰ متری از یکدیگر قرار گرفتند. شکل ۳، الف پاسخ گرانی این مدل‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در این شکل مقادیر بیشینه مربوط به دو استوانه در هم ادغام شده اما



شکل ۲: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل استوانه افقی در عمق ۵ متر و فاصله افقی ۴۵۰ متر (ایزوله). تمامی پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی ۰/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. از روی این شکل می‌توان موقعیت افقی توده (مرکز توده) را تعیین نمود. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل تجمع راه‌حل‌های خروجی منطبق بر مراکز دو توده مشاهده می‌شود. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



شکل ۳: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل استوانه افقی در عمق ۵ متر و فاصله افقی ۱۰۰ متر. تمامی پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است (دارای هم‌پوشانی). الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی ۰/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. از روی این شکل می‌توان موقعیت افقی توده (مرکز توده) را تعیین نمود. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل تجمع راه‌حل‌های خروجی منطبق بر مراکز دو توده مشاهده می‌شود. با این حال پراکندگی راه‌حل‌ها در مقایسه با شکل ۲ بیشتر است. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



شکل ۴: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل استوانه افقی در عمق ۵ متر و فاصله افقی ۵ متر. تمامی پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی  $0.03$  گرم بر سانتی‌متر مکعب. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. از روی این شکل تنها موقعیت افقی یک توده (مرکز توده) مشخص شده است (ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل پراکندگی راه‌حل‌های خروجی زیاد است. همچنین بین مقادیر عمق برآورد شده با مقدار واقعی اختلاف مشاهده می‌شود. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.

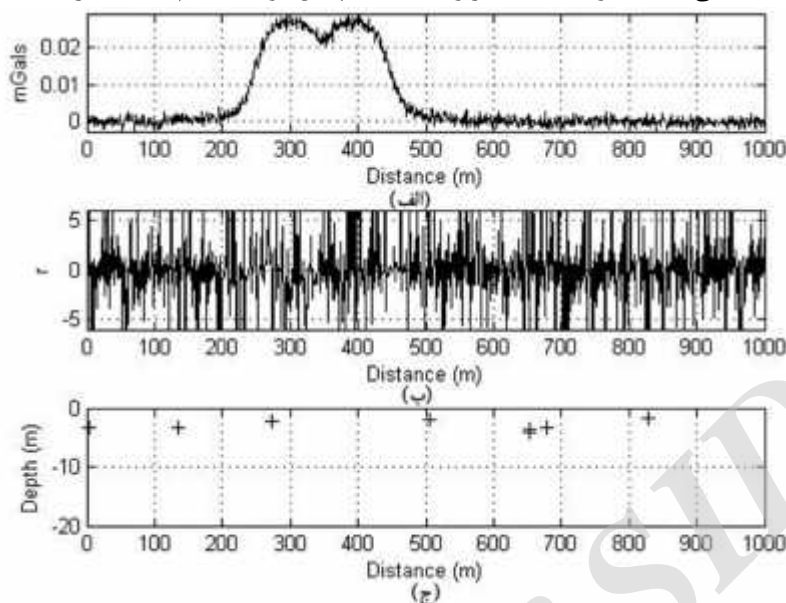
مدل کره را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار پاسخ گرانی در موقعیت  $x=500$  متر قرار دارد. شکل ۶، ب نمودار مقادیر  $r$  را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر  $r$  به صورت صعودی به نقطه  $x=500$  متر می‌رسد که منطبق بر مرکز کره است. نتایج تخمین عمق کره در شکل ۶، ج آمده است که تمرکز آنها در نقطه افقی ۵۰۰ متر است و عمق ۳۰ متر را برای کره نشان می‌دهد.

در شکل ۷، دو مدل کره با شعاع‌های ۶۰ متر در اعماق ۲۰ متر از سطح زمین قرار گرفته‌اند. فاصله افقی مراکز دو مدل ۵۰۰ متر و اختلاف چگالی آنها با اطراف  $0.02$  متر بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. طول پروفیل ۱۲۰۰ متر و فاصله نمونه‌برداری یک متر انتخاب شده است. شکل ۷، الف پاسخ گرانی کره‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل در موقعیت‌های  $x=400$  و  $x=900$  دو مقدار بیشینه مشاهده می‌شود که مراکز دو توده را نشان می‌دهد. شکل ۷، ب نمودار تغییرات  $r$  را برای این دو مدل نشان می‌دهد. در این شکل نیز مقادیر  $r$  با تغییرات صعودی به نقاط  $x=400$  و  $x=900$  متر می‌رسند که بیانگر مراکز دو توده است. نتایج تخمین عمق در شکل ۷، ج آمده است. در این شکل تمرکز

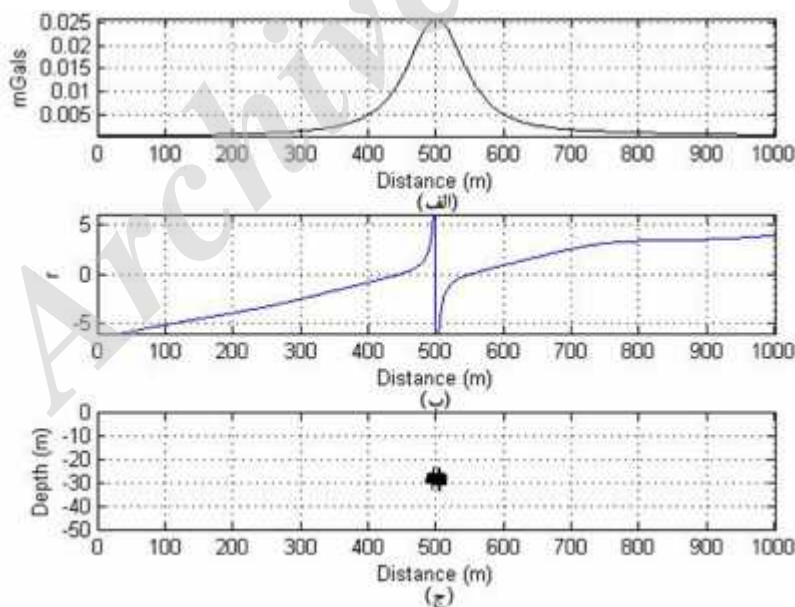
در شکل ۵ اثر نویزهای مصنوعی بر کارایی روش نشان داده شده است. در این شکل داده‌های گرانی‌سنجی دو استوانه افقی شکل ۳ توسط نویز مصنوعی معادل ۲ درصد داده‌ها آلوده شدند. شکل ۵، الف نمودار پاسخ گرانی دو مدل را نشان می‌دهد. در این شکل بی‌نظمی‌های محلی مشاهده شده در طول پروفیل بیانگر نویزهای مصنوعی است. شکل ۵، ب نمودار تغییرات  $r$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده شود در این شکل نمودار  $r$  دارای آشفتگی‌های زیادی است به طوری که نمی‌توان موقعیت مراکز دو توده را تعیین نمود. شکل ۵، ج نتایج تخمین عمق را نشان می‌دهد. در این شکل دو پدیده را می‌توان مشاهده نمود: پراکندگی نتایج و همچنین کاهش تعداد آنها که در اثر وجود نویز مصنوعی است.

شکل ۶ کاربرد روش را روی داده‌های گرانی‌سنجی مدل کره مدفون نشان می‌دهد. در این شکل کره با شعاع ۵۰ متر در عمق ۳۰ متر از سطح زمین قرار دارد. مرکز کره مدفون در موقعیت  $x=500$  متر واقع شده است. اختلاف چگالی مدل با اطراف  $0.02$  گرم بر سانتی‌متر مکعب فرض شده است. طول پروفیل ۱۰۰۰ متر و فاصله نمونه‌برداری ۱ متر فرض شده است. شکل ۶، الف نمودار پاسخ گرانی

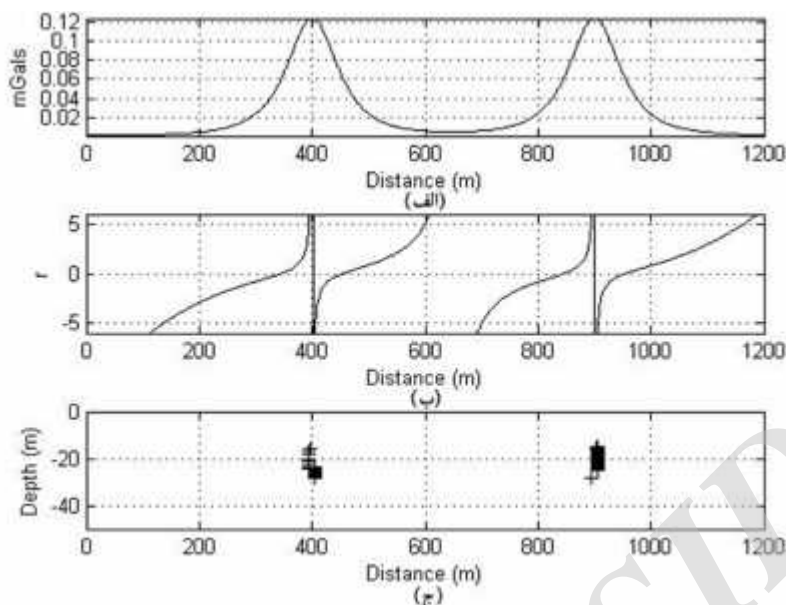
نتایج خروجی در موقعیت افقی  $x=400$  و  $x=900$  متر و همچنین موقعیت قائم  $z=20$  متر مشاهده می‌شود.



شکل ۵: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل استوانه افقی در عمق ۵ متر و فاصله افقی ۴۵۰ متر. تمامی پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی  $0.03$  گرم بر سانتی‌متر مکعب. داده‌ها توسط نویز مصنوعی معادل ۲ درصد آغشته شده‌اند. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. در این شکل آشفتگی و بی‌نظمی‌های زیاد مقادیر  $r$  مانع از تشخیص مراکز توده‌ها شده است. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل پراکندگی راه‌حل‌های خروجی زیاد و تعداد راه‌حل‌ها کم است. همچنین بین مقادیر عمق برآورد شده با مقدار واقعی اختلاف مشاهده می‌شود. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



شکل ۶: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی مدل کره مدفون در عمق ۳۰ متر و فاصله افقی ۵۰۰ متر. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی  $0.03$  گرم بر سانتی‌متر مکعب است. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. در این شکل مقادیر  $r$  به صورت صعودی به موقعیت  $x=500$  متر می‌رسد که منطبق بر مرکز توده است. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل تمرکز راه‌حل‌های خروجی در موقعیت افقی  $x=500$  متر و موقعیت قائم (عمق)  $z=30$  متر است. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



شکل ۷: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل کره در عمق ۲۰ متر و فاصله افقی ۵۰۰ متر. تمامی پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی ۰/۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. از روی این شکل می‌توان موقعیت افقی توده‌ها (مرکز توده) را تعیین نمود. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل تجمع راه‌حل‌های خروجی منطبق بر مراکز دو توده مشاهده می‌شود. با این حال پراکندگی راه‌حل‌ها در مقایسه با شکل ۶ بیشتر است. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.

مطالعات گرانی‌سنجی بررسی ویژگی‌های ثقلی توده‌های زیرسطحی، بررسی گسترش جانبی و عمقی آنها، ارتباط توده‌ها با رگه‌های مگنتیتی و همچنین تأیید بیشتر نتایج مطالعات مغناطیس‌سنجی در این منطقه است. مطالعات گرانی‌سنجی در محدوده مذکور روی ۱۸ پروفیل با راستای شمالی - جنوبی انجام شده است. فاصله پروفیل‌ها ۵۰ و ۱۰۰ متر و فاصله نقاط برداشت ۲۵ و ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

شکل ۹ نقشه بی‌هنجاری بوگر معدن سنگ آهن شواز را نشان می‌دهد. معمولاً برای جداسازی آنومالی‌های ناحیه‌ای و باقیمانده در روش گرانی‌سنجی به نکات زیر توجه می‌شود:

الف: سطح‌های بالاتر (چند جمله‌ای با درجات بالا) برای مناطق وسیع و با مقادیر ناحیه‌ای پیچیده (گرادیان بالا) به کار می‌رود.

ب: تهیه مقاطع مختلف از نقشه آنومالی بوگر و تهیه الگوی تغییرات ناحیه‌ای

ج: تهیه مقاطع مختلف از نقشه آنومالی ناحیه‌ای با درجات مختلف و مقایسه نتایج آنها

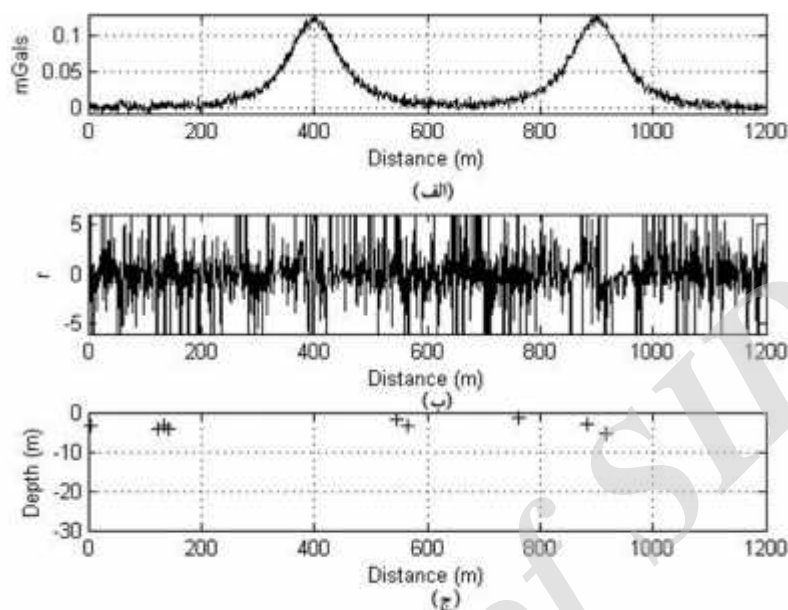
به منظور بررسی اثر نویز بر نتایج داده‌های گرانی‌سنجی مدل‌های کره شکل ۷ با نویزی معادل ۱ درصد داده‌ها آغشته شدند. نمودار پاسخ گرانی مدل‌ها در شکل ۸، الف آمده است. شکل‌های ۸، ب و ج به ترتیب نمودار ۲ و نتایج راه‌حل‌های تخمین عمق دو توده را نشان می‌دهد که به دلیل اثرات نویز قابل استفاده نیستند.

#### ۴- داده‌های گرانی‌سنجی معدن سنگ آهن شواز

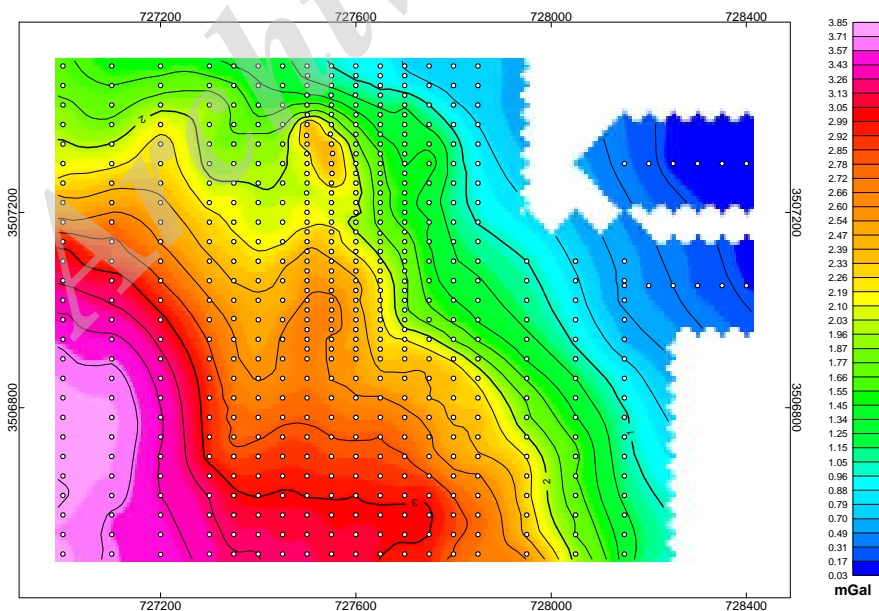
محدوده مورد مطالعه در نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش آباده و در جنوب غرب روستای شواز در استان یزد و در طول شرقی ۵۳ درجه و ۳۹ دقیقه و طول شمالی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه قرار دارد. محدوده مورد اکتشاف در ۱۱۱ کیلومتر جنوب غربی استان یزد و به فاصله ۲۵ کیلومتری روستای شواز قرار گرفته است. برداشت‌های زمینی گرانی‌سنجی در منطقه معدن سنگ آهن شواز توسط دستگاه گرانی‌سنجی مدل *Sintrex-CG5* با دقت ۰/۰۱ میلی‌گال ساخت کشور کانادا انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌های برداشت توسط نقشه برداری و با دقت سانتی‌متر روی زمین علامت‌گذاری شده‌اند. هدف از



د: تهیه نقشه‌های آنومالی باقیمانده با درجات مختلف آنومالی ناحیه‌ای و مقایسه نتایج با زمین‌شناسی منطقه.  
ه: انتخاب درجه مناسب آنومالی ناحیه‌ای منطقه مورد نظر.



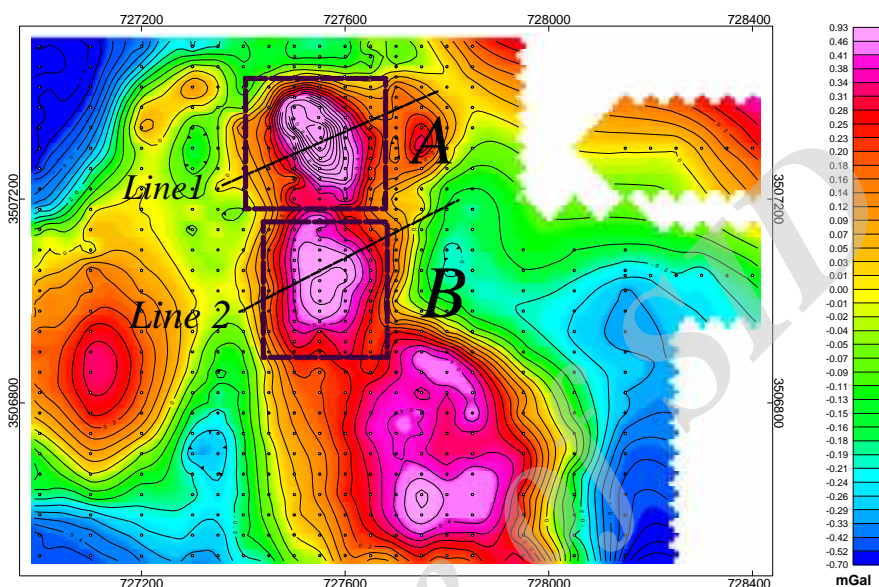
شکل ۸: کاربرد روش روی داده‌های گرانی‌سنجی دو مدل استوانه افقی در عمق ۲۰ متر و فاصله افقی ۵۰۰ متر. تمام پارامترهای دو توده یکسان فرض شده است. الف) پاسخ گرانی مدل‌های مذکور با اختلاف چگالی ۰/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب. داده‌ها با نویزی معادل ۱ درصد کل داده‌ها آغشته شده‌اند. ب) نمودار مقادیر  $r$  مربوط به نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌های گرانی‌سنجی. تغییرات زیاد نمودار  $r$  مانع از تشخیصی مراکز دو توده خواهد شد. ج) نتایج تخمین عمق با استفاده از روش نسبت گرادیان. در این شکل نتایج تخمین عمق به هیچ وجه قابل استفاده نیستند. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



شکل ۹: نقشه بی‌هنجاری بوگر معدن سنگ آهن شواز در استان یزد. دایره‌های سفید رنگ موقعیت ایستگاه‌های برداشت را نشان می‌دهد.

تأیید می‌کند. دایره‌های سفید موقعیت ایستگاه‌های برداشت را نشان می‌دهد. بر روی نقشه گرانی باقیمانده معدن شواز دو پروفیل به نام‌های *line 1* و *line 2* مشخص شده که به عنوان ورودی به الگوریتم تخمین عمق نسبت گرادیان داده شده است.

مقادیر بوگه بین  $\frac{3}{5}$  تا  $\frac{0.85}{1}$  میلی گال متغیر هستند. برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی از تکنیک تحلیل روند سطحی و استفاده از سطح درجه ۱ استفاده شده که نقشه گرانی باقیمانده حاصل در شکل ۱۰ آمده است. در این نقشه چهار حوزه گرانی بسته و بیشینه دیده می‌شود که همگی نقشه مغناطیس باقیمانده را نیز



شکل ۱۰: نقشه بی‌هنجاری باقیمانده معدن سنگ آهن شواز در استان یزد. *line 2* و *line 1* پروفیل‌های مورد استفاده در تخمین عمق به روش نسبت گرادیان است. مستطیل‌های *A* و *B* قسمتی از بی‌هنجاری باقیمانده گرانی است که به عنوان ورودی به روش تخمین عمق تحلیل طیف انرژی وارد شده است.

استفاده از نتایج طیف انرژی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این روش نیز دو توده در اعماق ۲ و ۵۰ متر را به عنوان منابع مولد بی‌هنجاری در این قسمت شناسایی کرده است.

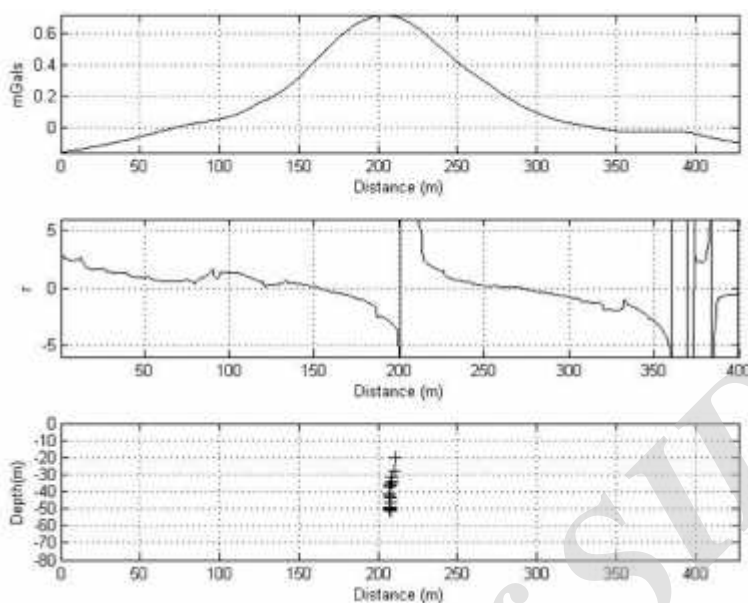
شکل ۱۴، الف و ب به ترتیب منحنی‌های طیف انرژی و تغییرات عمقی داده‌های گرانی سنجی قسمت *B* را نشان می‌دهد. ژنز کانسار آهن در محدوده مورد مطالعه از نوع اسکارن کلسیک است. در این گونه کانسارها دو زون شامل اسکارن درونی و بیرونی (اندو و اگزواسکارن) قابل تشخیص است. معمولاً زون اندواسکارن دارای پراکندگی و تغییرات عمقی کم و زون اگزواسکارن دارای تغییرات عمقی بیشتری است. در این محدوده نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی حاکی از این است که توده *A* زون اندواسکارن و زون *B* زون اگزواسکارن است و تغییرات عمقی در محدوده *B* را می‌توان به همین موضوع نسبت داد. همچنین عوامل

نتایج مربوط به روش پیش گفته شده روی پروفیل *line 1* در شکل ۱۱ آمده است. در این شکل دو توده زیرسطحی در اعماق ۲۰ و ۵۰ متری را می‌توان شناسایی نمود (به عبارت دیگر تغییرات عمقی توده بین ۲۰ تا ۵۰ متر است).

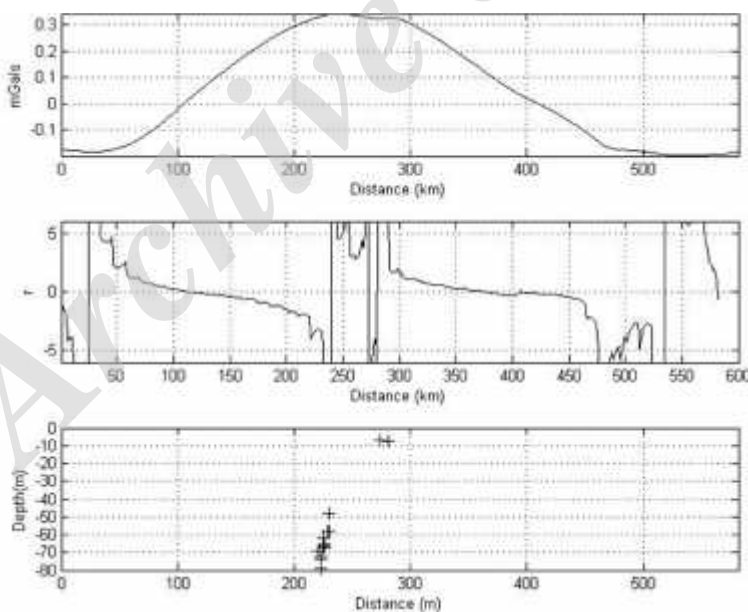
شکل ۱۲ نتایج مربوط به روش تخمین عمق نسبت گرادیان روی پروفیل *Line 2* را نشان می‌دهد. در این شکل یک توده در عمق ۱۰ متر و توده دیگری در عمق ۸۰ متر دیده می‌شود.

برای مقایسه نتایج حاصل از روش نسبت گرادیان، دو قسمت از نقشه بی‌هنجاری باقیمانده که از آنها پروفیل گرانی سنجی تهیه شده بود (مستطیل‌های *A* و *B*) به عنوان ورودی به الگوریتم تخمین عمق به روش تحلیل طیف انرژی داده شد. شکل ۱۳، الف منحنی طیف انرژی مربوط به قسمت *A* و شکل ۱۳، ب منحنی تغییرات عمقی توده با

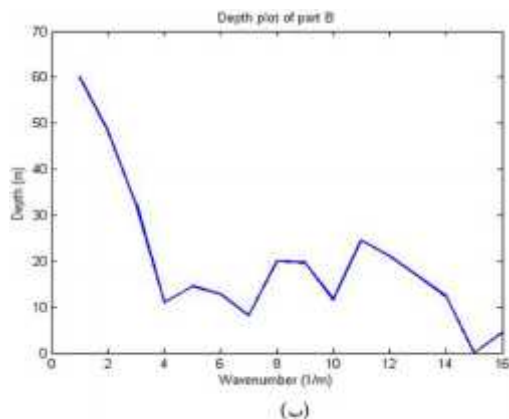
ساختاری مانند شکستگی و گسل نیز می‌تواند دلیلی دیگر بر تغییرات عمقی باشد.



شکل ۱۱: نتایج تخمین عمق به روش نسبت گرادیان مربوط به پروفیل *line1* از نقشه باقیمانده گرانی معدن سنگ آهن شواز. الف) پروفیل گرانی باقیمانده *line1* از نقشه باقیمانده گرانی سنجی. موقعیت پروفیل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ب) نمودار مقادیر  $r$  (نسبت گرادیان قائم به افقی) داده‌های قسمت الف. ج) نتایج تخمین عمق داده‌های گرانی سنجی قسمت الف. طبق این شکل حدود تغییرات عمقی توده بین ۲۰ تا ۵۰ متر متغیر است. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



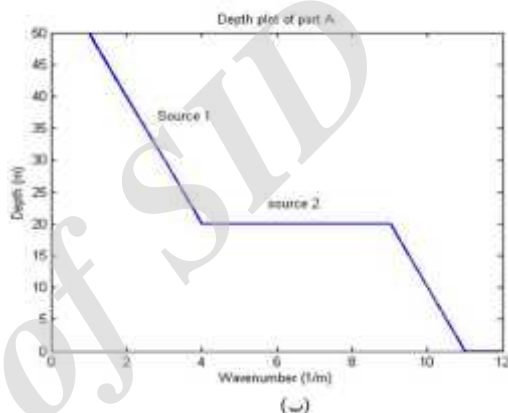
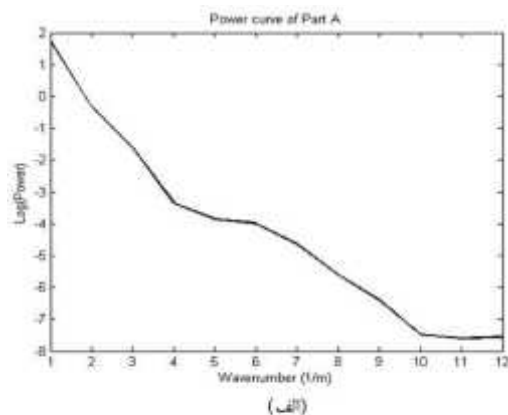
شکل ۱۲: نتایج تخمین عمق به روش نسبت گرادیان مربوط به پروفیل *line2* از نقشه باقیمانده گرانی معدن سنگ آهن شواز. الف) پروفیل گرانی باقیمانده *line2* از نقشه باقیمانده گرانی سنجی. موقعیت پروفیل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ب) نمودار مقادیر  $r$  (نسبت گرادیان قائم به افقی) داده‌های قسمت الف. ج) نتایج تخمین عمق داده‌های گرانی سنجی قسمت الف. طبق این شکل حدود تغییرات عمقی توده بین ۵۰ تا ۸۰ متر متغیر است. راه‌حل‌ها با استفاده از نماد (+) مشخص شده‌اند.



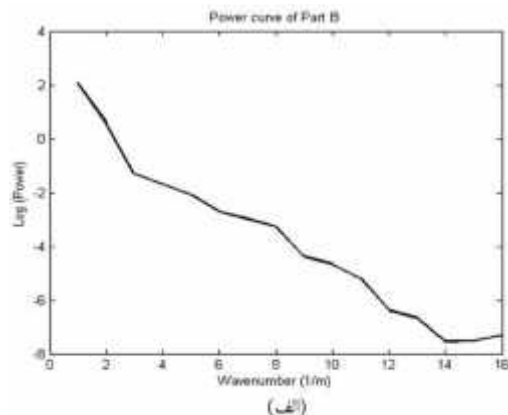
شکل ۱۴: استفاده از روش تخمین عمق طیف انرژی روی قسمت B از نقشه بی‌هنجاری گرانی معدن شواز جهت مقایسه نتایج روش نسبت گرادیان. الف) نمودار طیف انرژی داده‌های گرانی سنجی قسمت B از نقشه بی‌هنجاری باقیمانده گرانی معدن سنگ آهن شواز. ب) نمودار تخمین عمق قسمت ۱ با استفاده از مقادیر طیف انرژی داده‌ها.

#### ۵- نتیجه‌گیری

روش تیلت-عمق یکی از روش‌های خودکار است که امروزه برای تفسیر پروفیل‌های گرانی سنجی استفاده می‌شود. روابط این روش بر اساس مدل مغناطیسی کنتاکت قائم است. در این روش فرض می‌شود که هر دو کنتاکت و مغناطیس‌شدگی آن قائم هستند. در مواردی که این شرط برقرار نباشد از تکنیک تبدیل به قطب استفاده می‌شود. در این مقاله روش تیلت-عمق برای کاربرد روی مدل‌های گرانی استوانه افقی و کره توسعه داده شده است. اساس این روش نیز استفاده از نسبت گرادیان قائم به افقی داده‌ها،  $r$  است. بدین صورت از تمامی مقادیر  $r$  برای تخمین مرز و عمق توده‌ها استفاده می‌شود. کارایی روش‌های ارائه شده روی داده‌های گرانی سنجی کره و استوانه افقی در حالت‌های مختلف بررسی شدند. بررسی‌ها نشان داد که نتایج این روش نسبت به نویز و همجواری توده‌ها حساس است. بهترین فاصله بین دو توده مجاور که تأثیری بر نتایج این روش ندارد، حداقل ۴ برابر عمق توده است. همچنین روش ارائه شده روی دو پروفیل گرانی سنجی مربوط به برداشت‌های گرانی سنجی معدن سنگ آهن شواز استان یزد به کار برده شد. نتایج این روش وجود دو توده در اعماق ۲۰ و ۵۰ متر و همچنین ۱۰ و ۸۰ متر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: استفاده از روش تخمین عمق طیف انرژی روی قسمت A از نقشه بی‌هنجاری گرانی معدن شواز جهت مقایسه نتایج روش نسبت گرادیان. الف) نمودار طیف انرژی داده‌های گرانی سنجی قسمت A از نقشه بی‌هنجاری باقیمانده گرانی معدن سنگ آهن شواز. ب) نمودار تخمین عمق قسمت A با استفاده از مقادیر طیف انرژی داده‌ها. بر طبق این نمودار دو منبع با عمق‌های ۲۰ و ۵۰ متر مولد بی‌هنجاری گرانی این قسمت هستند. نتایج این شکل توسط نرم‌افزار Mag2dc در محیط متلب انجام شده است. این نرم‌افزار توسط Stocco(2008) نوشته شده است.



Enhanced local wavenumber approach: Geophysics, 70, L7-L14.

[13] Fedi, M., 2007, DEXP: a fast method to determine the depth and the structural index of potential fields sources: Geophysics, 72, I1–I11.

[14] 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.

برای مقایسه نتایج روش ارائه شده از روش تحلیل طیف انرژی استفاده شد که نتایج این روش را تأیید می‌کند.

## مراجع

[1] Hartman, R.R., Teskey, D.J., Friedberg, J.L., 1971, A system for rapid digital aeromagnetic interpretation: Geophysics, 36, 891–918.

[2] Thurston, J., Smith, R., 2007, Source location using total-field homogeneity: introducing the SLUTH method for depth estimation: The Leading Edge, 1272–1276.

[3] Saille, P., Gibert, D., 2003. Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: two dimensional wavelets and multipolar approximations: Journal of Geophysical Research, 108, 22–62.

[4] Thomson, D.T., 1982, Eulph: a new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data: Geophysics, 47(1), 31–37.

[5] Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J., Somerton, I.W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: Geophysics, 55, 80–91.

[6] Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Ravat, D., 2007, Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives: The Leading Edge, 1502–1505.

[7] Miller, H.G., Singh, V., 1994, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources: Journal of Applied Geophysics, 32, 213–217.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Fairhead, J.D. and Williams, S.E. 2006, Evaluating normalized magnetic derivatives for structural mapping: 76th SEG meeting, New Orleans, Louisiana, USA, Expanded Abstracts.

[11] Cooper, G.R.J., 2004. A semi-automatic procedure for the interpretation of geophysical data: Exploration Geophysics, 35 (3), 180–185.

[12] Salem, A., Ravat, D., Smith, R., and Ushijima, K., 2005, interpretation of magnetic data using the

# Automatic Interpretation of Gravity Profiles Using Data Gradient Ratio

K. Alamdar<sup>1\*</sup>, M. Golabi<sup>2</sup>, M. Shariatmadari<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University, Iran

2- MSc student in Mining, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University, Iran

3- Instructor, Faculty of Science, Yazd University, Iran

\* Corresponding Author: kamal.alamdar@gmail.com

(Received: November 2014, Accepted: March 2016)

---

## Keywords

Automatic  
Tilt-Depth  
Contact  
Horizontal Cylinder  
Buried Sphere  
Power Spectrum Analysis  
Shavaz Iron Ore

## English Extended Abstract

### Summary

One of the most important problems in the interpretation of gravity or magnetic data is to obtain information about the sources position (geometry and depth). Potential field automatic interpretation techniques can significantly decrease the interpretation workload of a geophysicist and are widely used. Automatic interpretation methods can be classified into two major groups: modeling and analytical. Euler Deconvolution, Werner Deconvolution and recently, Tilt-Depth method are the commonly used (practical goals) analytical methods. The basic idea in Tilt-Depth method is

simultaneous application of tilt angle for edge and depth estimation of magnetic contact model. In this method, the vertical and horizontal gradients of magnetic contact substituted in tilt equation lead to an equation for depth estimation. This paper generalizes the tilt-depth method to gravity data using the horizontal cylinder and the buried sphere models.

## Introduction

Salem et al, (2007) introduced the tilt-depth method for the magnetic anomaly over a contact. Previously Miller and Singh had developed the tilt angle as a method of enhancing images of the vertical derivative of potential field data. The tilt-depth method only depends on mapping specific contours of the magnetic tilt angles. The zero contours delineate the spatial location of the magnetic source edges whilst the depth to the source is the distance between the zero and either the  $-45^\circ$  or the  $+45^\circ$  contour or their average. The tilt-depth method adds to the arsenal of geophysical methods currently in use to estimate magnetic source depths, many of which use second- and/or third-order derivatives. These include methods based on Euler's equation and the local wavenumber, both of which calculate the source depths for a range of source-body geometries, and, more recently, for the simultaneous estimation of both source depth and source type.

## Methodology and Approaches

In this paper, the tilt-depth method will be both generalized (by applying it to gravity models) and extended (by using all values of the ratio of the field gradients, not just a single value). The gravity models used are 2D horizontal cylinder and buried sphere. In this regard we developed a MATLAB code for applying the proposed method to synthetic and real data. In this code the selection of the ratio of the vertical to horizontal derivatives are done on the basis of the signal to noise ratio of the dataset. Also for the consistency of result the vertical derivative is calculated using Hilbert transform. The final equation was solved by Newton method.

## Results and Conclusions

The efficiency of the proposed method tested using various synthetic gravity models. The sensitivity of methods to noise and interface was tested using synthetic data. On the basis of observations the method is sensitive to noise, but if the data continued upward before applying the algorithm or using of the stable derivative operator the inconsistency of the result decreases seriously. For overcome in body overlapping phenomena we suggest anomaly windowing or insulating by means of Bott (1966) algorithm. This method applied on 2 gravity profiles from Shavaz Iron ore in Yazd province. Then the results compared with power spectrum depth analysis. Accordance to this comparison the proposed method could produce the same result as power spectrum. In this case w upward gravity data to 2m in order to decrease noise content.

---

## Cite this paper:

Alamdar, K., Golabi, M., Shariatmadari, M., (2015). "Automatic Interpretation of Gravity Profiles Using Data Gradient Ratio" Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering 5(10): 1-13.