

## توازن داده‌های میدان پتانسیل با استفاده از تبدیل هیلبرت

علی نجاتی کلاته<sup>۱</sup> و امین روشندل کاهو<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(دریافت: ۸۹/۱۱/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

### چکیده

تاکنون روش‌های گوناگونی برای تشخیص مرز بی‌هنجاری‌ها معرفی شده است که از جمله می‌توان به سیگنال تحلیلی، فیلتر زاویه شیب و گرادیان‌های افقی کلی اشاره کرد. در بسیاری از موارد بررسی بی‌هنجاری‌های با دامنه کم از نظر زمین‌شناسی از اهمیت بیشتری نسبت به بی‌هنجاری‌های با دامنه بزرگ برخوردار هستند. می‌توان گفت که توانایی روش‌های موجود برای آشکارسازی محدوده ساختارهای زمین‌شناسی به‌شدت به عمق آن ساختار وابسته است. در این مقاله، تبدیل هیلبرت دوبعدی تصویر داده‌های میدان پتانسیل برای متوازن‌سازی به‌کار گرفته شده است. به‌منظور نشان دادن کارایی روش متوازن‌سازی روی تصاویر حاصل از دو روش متداول انحنای نیم‌رخ و زاویه کجی (Tilt angle) که به عمق ناهنجاری وابستگی دارند، اعمال شد. نتایج حاصل از داده‌های مصنوعی روشن ساخت که روش پیش‌گفته می‌تواند توازن مطلوبی میان دامنه‌های مربوط به ناهنجاری‌های با اعماق متفاوت ایجاد کند. یکی از داده واقعی مورد استفاده مربوط به ناهنجاری عمیق نفوذی گرانیتهی ترامپسبرگ و دیگری مربوط به بخشی از حوضه رسوبی ایران مرکزی شامل یک ساختار نمکی است. استفاده از روش متوازن‌سازی بهبود قابل‌توجهی در کیفیت تصاویر روش‌های متداول ایجاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، مرز آنومالی، تبدیل هیلبرت، توازن داده‌ها

## Potential field data balancing using the Hilbert transform

Nejati Kalateh, A.<sup>1</sup> and Roshandel Kahoo, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

(Received: 14 Feb 2011, Accepted: 03 Jul 2012)

### Abstract

Potential field images obtained in potential field data measurements are suitable tools for mineral and hydrocarbons resources explorations. These images consist of different anomalies which in many cases are contaminated with noise. The horizontal location of the boundaries of potential field anomaly sources is of interest in potential field interpretation. However, the edge of potential field sources is not clear, because of the loss of resolution of the anomaly shape with respect to the shape of their sources. Edge enhancement is a technique, applied to potential field data to produce regions of constant field amplitude that are separated by sharp boundaries, as an aid to interpretation.

Various methods have been introduced for anomaly edge detection, such as the analytic signal, tilt angle, total horizontal gradient and profile curvature. The tilt angle is the ratio of the first vertical derivative to the horizontal gradient. Curvature of the geophysical data is one of the most important attributes with many applications in geophysical data processing and interpretation. The profile curvature at a point shows the change in slope in maximum gradient direction. We can compute the tilt angle and profile

curvature by Eq. (1) and Eq. (2), respectively.

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

$$PRC = \frac{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}{p \sqrt{(p+1)^3}} \quad (2)$$

where,  $f$  is potential field and

$$p = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

In many cases of geological interpretation of potential field data, the study of low-amplitude anomalies is more important than the high-amplitude anomalies. However, most existing methods for determining the lateral expansion of geological structure are sensitive to amplitude of the potential data. Amplitude of potential field data has a direct relationship with depth of the geological structure. So we can say that the efficiency of methods to detect geological structures severely depends on the depth of geological structures. Automatic gain control filters can construct the balanced image of all anomalies by assigning the computed gain of each window of the data to the center of it. In this paper, we used two-dimensional Hilbert transform to balance the image of potential field data as Eq. (4).

$$IMG_b = \frac{IMG}{k + \sqrt{H_x^2(IMG) + H_y^2(IMG) + IMG^2}} \quad (4)$$

Where,  $H_x$  and  $H_y$  are 2-D Hilbert transforms of image in  $x$  and  $y$  directions, respectively.

In order to show the efficiency of proposed method to balance the potential field images, we test the method on two usual edge detection methods entitled as profile curvature and the tilt angle filter. We used a model with three anomalies with various depths as the synthetic model. Results from synthetic data showed that the profile curvature and the tilt angle filter cannot detect the edges of the deep anomalies as well as shallow anomalies. By applying the 2-D Hilbert transform based balancing method on images of common method the resolution of detected edges of anomalies for deep and shallow anomalies are balanced. We used the gravity anomalies related to granite intrusion at Trompsburge, South Africa and salt dome at sedimentary basin, Center of Iran as real data. Balancing method improved significantly the images resulted from profile curvature and the tilt angle filter.

**Key words:** Potential field, Anomaly edge, Hilbert transform, Data balancing

## ۱ مقدمه

مهم است که استفاده از آن در داده‌های میدان پتانسیل و داده‌های لرزه‌ای بازتابی دارای سابقه طولانی است (فیلیس و همکاران، ۲۰۰۷؛ بلومنتریت و همکاران، ۲۰۰۶). در واقع انحنای نیم‌رخ در هر نقطه نرخ تغییرات شیب در راستای گرادیان بیشینه را نشان می‌دهد. انحنای نیم‌رخ داده‌های میدان پتانسیل به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (میتاسوا و یاراسلاف، ۱۹۹۳):

$$PRC = \frac{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}{p \sqrt{(p+1)^3}} \quad (1)$$

که در آن،  $f$  میدان پتانسیل و

$$p = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \quad (2)$$

از آنجا که بیشینه مقادیر مشتق اول در نقاط صفر مشتق دوم اتفاق می‌افتند بنابراین در نقاط مرز ناهنجاری‌ها انتظار می‌رود که انحنای نیم‌رخ دارای مقداری نزدیک به صفر باشد. نتایج روش انحنای نیم‌رخ به شدت به دامنه داده‌های میدان پتانسیل وابسته است. بنابراین این روش در تعیین لبه‌های ناهنجاری‌های کم دامنه که معمولاً معادل ناهنجاری‌های عمیق هستند، عملکرد ضعیفی دارد.

فیلتر فاز محلی یکی دیگر از ابزارهایی است که به منظور بهبود کیفیت تصاویر داده‌های میدان پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. میلر و سینگ (۱۹۹۴) فیلتر فازی زاویه کجی را به صورت رابطه (۳) معرفی کردند.

$$T = \tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left( \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right)}} \right) \quad (3)$$

تعیین محدوده بی‌هنجاری یا به عبارت دیگر تعیین لبه‌های بی‌هنجاری یکی از اساسی‌ترین گام‌های تفسیر داده‌های گرانی است. تعیین محدوده هندسی و گسترش جانبی ساختارهای زمین‌شناسی در تحقیقات ژئوفیزیکی یکی از پارامترهای مهم است. تاکنون روش‌های گوناگونی برای تشخیص مرز بی‌هنجاری‌ها معرفی شده است که از جمله می‌توان به سیگنال تحلیلی، فیلتر زاویه شیب و گرادیان‌های افقی کلی اشاره کرد (کوپر و کوان، ۲۰۰۸).

دامنه داده‌های میدان پتانسیل محدوده گسترده‌ای از دامنه‌ها را شامل می‌شود. در بسیاری از موارد بررسی بی‌هنجاری‌های با دامنه کم از نظر زمین‌شناسی، اهمیت بیشتری نسبت به بی‌هنجاری‌های با دامنه بزرگ دارند (کوپر، ۲۰۰۹). اما اکثر روش‌های موجود برای تعیین گسترش جانبی ساختار زمین‌شناسی به دامنه میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده حساس هستند. دامنه میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده رابطه مستقیمی با عمق ساختار زمین‌شناسی دارد. بنابراین می‌توان گفت که توانایی روش‌های موجود برای آشکارسازی محدوده ساختارهای زمین‌شناسی به شدت به عمق آن ساختار وابسته است. به عبارت دیگر با افزایش عمق ساختار زمین‌شناسی قدرت تفکیک محدوده آشکار شده با روش‌های مرسوم کاهش می‌یابد. فیلترهای تقویت دامنه خودکار با محاسبه مقدار تقویت در هر پنجره از داده و نسبت دادن آن به مرکز پنجره می‌توانند تصاویر متوازی از همه بی‌هنجاری‌ها با دامنه یکسان ایجاد کنند (راجاگوپالان و میلیگان، ۱۹۹۵).

## ۲ بهبود کیفیت تصاویر داده‌های میدان پتانسیل

روش‌های گوناگونی برای بهبود کیفیت تصاویر حاصل از برداشت‌های میدان پتانسیل وجود دارد. دو روش متداول برای این هدف، روش انحنای نیم‌رخ و روش زاویه کجی هستند. انحنای داده‌های ژئوفیزیکی یکی از نشانگرهای

$$H(u, v) = -i \operatorname{sign}(u, v) \quad (5)$$

که در آن،  $u$  و  $v$  عددموج فوریه است و

$$\operatorname{sign}(u, v) = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \hat{e}_x + \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \hat{e}_y \quad (6)$$

که در آن،  $\hat{e}_x$  و  $\hat{e}_y$  بردارهای واحد در راستای  $x$  و  $y$  است.

#### ۴ مدل مصنوعی

برای بررسی کارایی روش‌های متداول انحنای نیم‌رخ و زاویه کجی و متوازن شده آنها از مدل مصنوعی که در اکثر مقالات معتبر بدان اشاره شده است، استفاده می‌شود. در شکل ۱ موقعیت مکانی سه ناهنجاری از زوایای دید متفاوت نشان داده شده است.

در این شکل‌ها، ترتیب صعودی عمق ناهنجاری‌ها به صورت ناهنجاری سرخ، آبی و سبز است. در شکل ۲ نیز مدل مصنوعی به صورت سه بُعدی به همراه ناهنجاری گرانی محاسبه شده نشان داده شده است. به داده‌ها نوفه تصادفی با شدت ۰/۱ درصد بیشینه دامنه ناهنجاری اضافه شده است (کوپر و کوان، ۲۰۰۸).

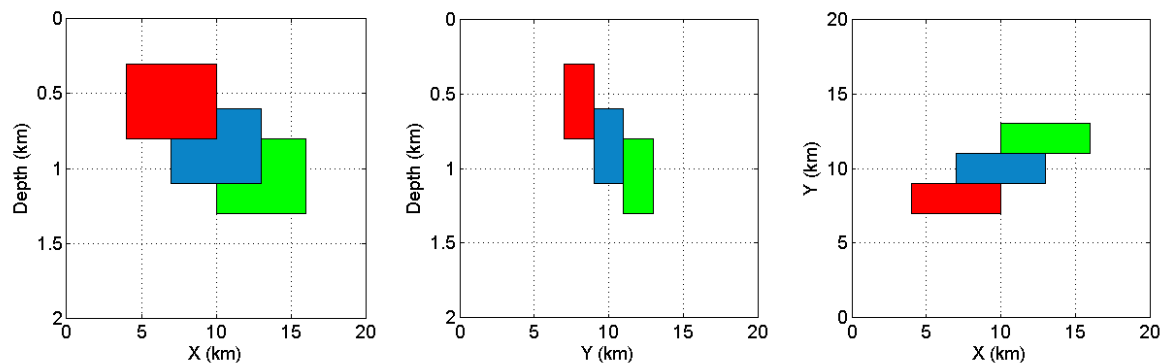
فیلتر زاویه کجی هنگامی که نقاط مشاهده روی چشمه ناهنجاری قرار دارد، دارای مقادیر مثبت است. در لبه بی‌هنجاری‌ها مقدارگردیان قائم برابر با صفر و گردیان‌های افقی بیشینه هستند، بنابراین مقدار این فیلتر در لبه‌ها برابر با صفر و در سایر نقاط، فیلتر دارای مقدار منفی خواهد بود. این روش نیز برای ناهنجاری‌های عمیق کارایی ضعیفی دارد.

#### ۳ توازن تصاویر داده‌های میدان پتانسیل

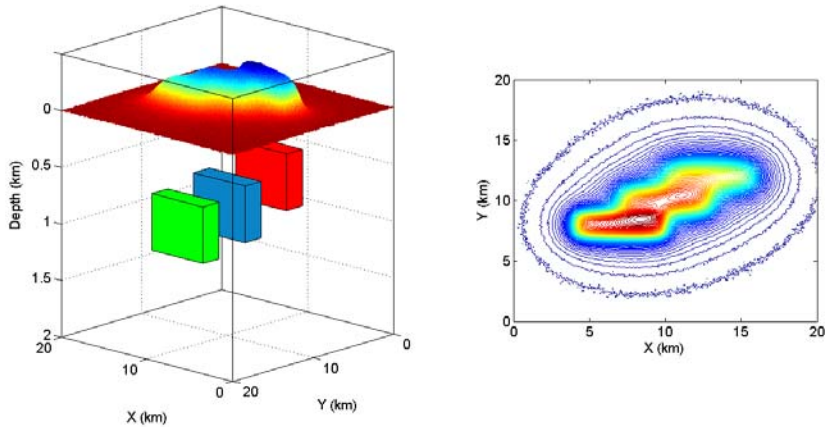
برای بهبود کارایی روش‌های پیش‌گفته در تعیین مرز ناهنجاری‌ها می‌توان تصاویر به دست آمده از آنها را متوازن ساخت. برای متوازن کردن هر تصویر از داده‌های میدان پتانسیل می‌توان از رابطه (۴) استفاده کرد (کوپر، ۲۰۰۹):

$$IMG_b = \frac{IMG}{k + \sqrt{H_x^2(IMG) + H_y^2(IMG) + IMG^2}} \quad (4)$$

که در آن،  $H_x$  و  $H_y$  به ترتیب تبدیل هیلبرت تصویر در راستای محور  $x$  و  $y$  است و  $k$  یک مقدار ثابت است که کارایی فیلتر را کنترل می‌کند. عملگر تبدیل هیلبرت دو بُعدی به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (مون و همکاران، ۱۹۸۸):



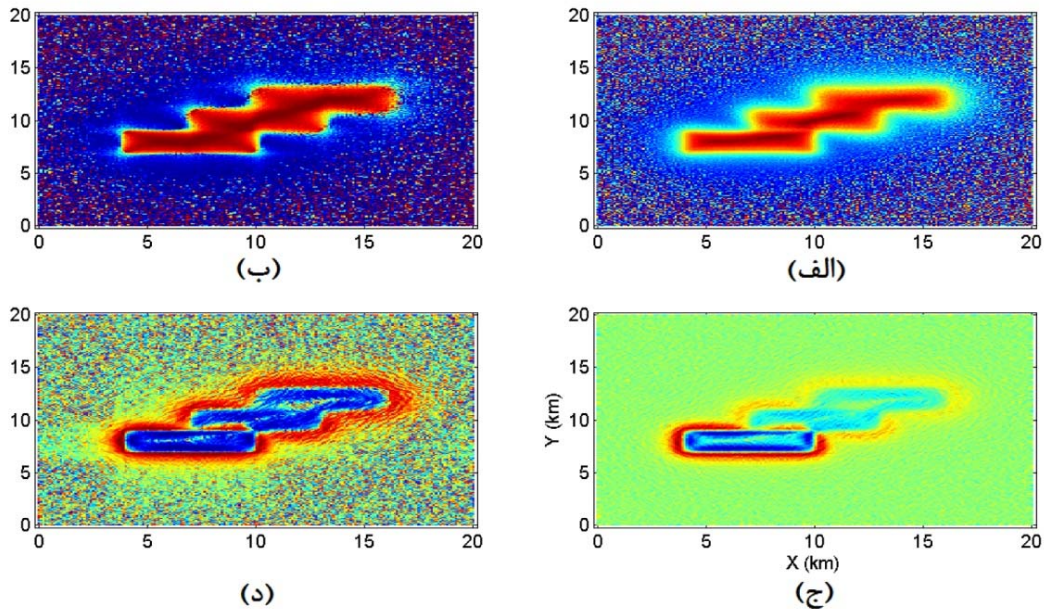
شکل ۱. موقعیت مکانی سه ناهنجاری از زوایای دید متفاوت.



شکل ۲. مدل مصنوعی در حالت سه‌بُعدی به‌همراه ناهنجاری گرانی.

برای ناهنجاری‌های کم‌عمق و عمیق بهبود قابل توجهی یافته است. به‌عبارت‌دیگر دامنه ناهنجاری پس از اعمال فیلتر انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی با افزایش عمق ناهنجاری کاهش می‌یابد. در مقابل متوازن‌سازی این فیلترها دامنه‌های یکسانی را برای ناهنجاری‌ها با عمق‌های متفاوت ایجاد کرده است.

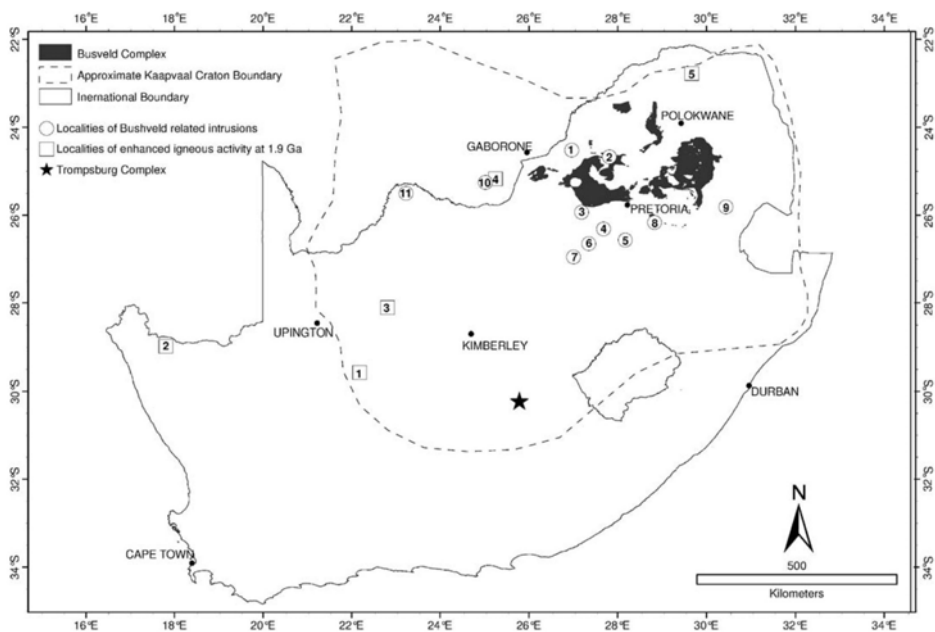
در شکل ۳ نتایج اعمال دو روش انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی و متوازن شده آنها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعیین لبه‌ها در هر دو روش برای ناهنجاری کم‌عمق به‌صورت مطلوبی صورت گرفته است. با افزایش عمق ناهنجاری کیفیت تفکیک لبه‌ها افت چشمگیری نشان می‌دهد. پس از اعمال روش متوازن‌سازی مطابق رابطه (۴) کیفیت لبه‌های ناهنجاری



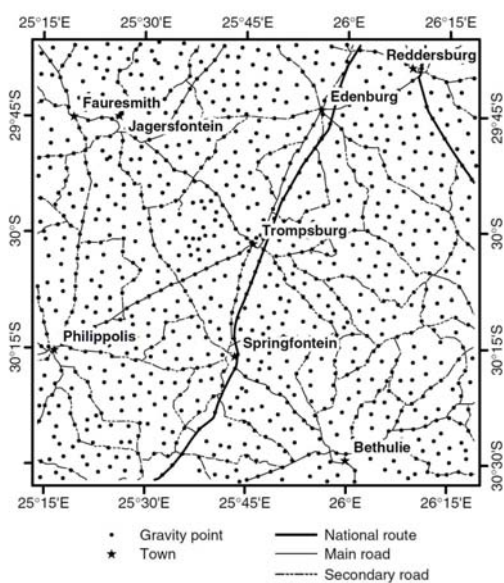
شکل ۳. نتایج تعیین مرز ناهنجاری‌ها با استفاده از (الف) فیلتر زاویه کجی، (ب) فیلتر زاویه کجی متوازن، (ج) فیلتر انحناى نیم‌رخ و (د) فیلتر انحناى نیم‌رخ متوازن.

۵ دانه واقعی  
 بوچمان، ۱۹۶۰؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۸). در شکل ۴ نقشه  
 جغرافیایی ناحیه مربوط نشان داده شده است. نقاط  
 برداشت داده‌های گرانی در شکل ۵ و بخشی از ناهنجاری  
 بوگه مربوط به ناحیه ترامسبرگ با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰  
 کیلومتر به دست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است.

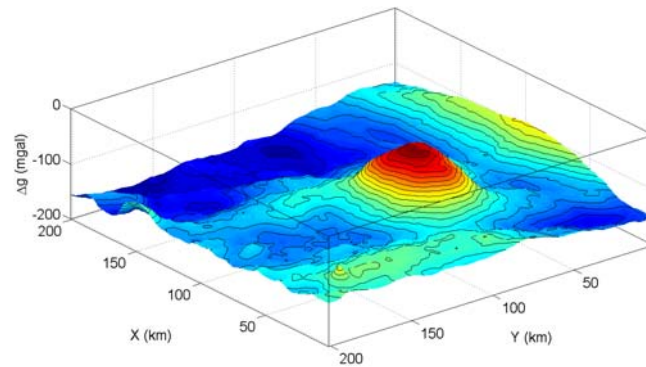
داده واقعی مورد بررسی در این مقاله، مربوط به ناحیه  
 ترامسبرگ واقع در افریقای جنوبی است. در این ناحیه  
 توده نفوذی وجود دارد که منشا آن براساس تحقیقات  
 صورت گرفته یک سیل گرانیتی است (کوپر، ۲۰۰۹؛



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی ناحیه ترامسبرگ (مار و کوله، ۲۰۰۶).



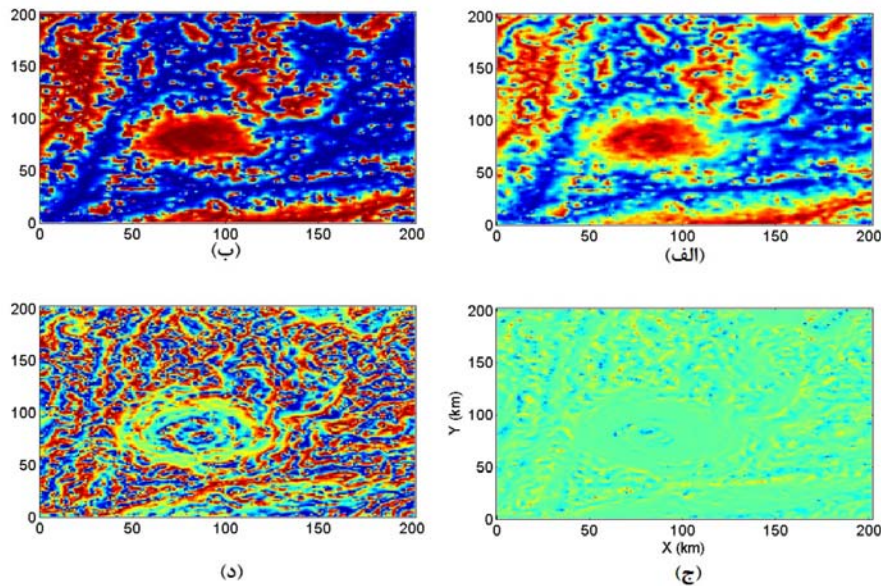
شکل ۵. موقعیت جغرافیایی نقاط برداشت داده‌های گرانی (مار و کوله، ۲۰۰۶).



شکل ۶. بخشی از ناهنجاری بوگه مربوط به ناحیه ترامسبرگ با ابعاد ۲۰۰ × ۲۰۰ کیلومتر.

استفاده قرار گرفت. در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نقشه ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی و ناهنجاری بوگه برداشت شده در آن ناحیه نشان داده شده‌اند. شکل ۱۰ نتایج اعمال دو روش انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی و متوازن شده آنها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، لبه‌های تعیین شده با دو روش انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی، کیفیت مطلوبی ندارد. پس از اعمال روش متوازن‌سازی کیفیت لبه‌های ناهنجاری بهبود قابل توجهی یافته است.

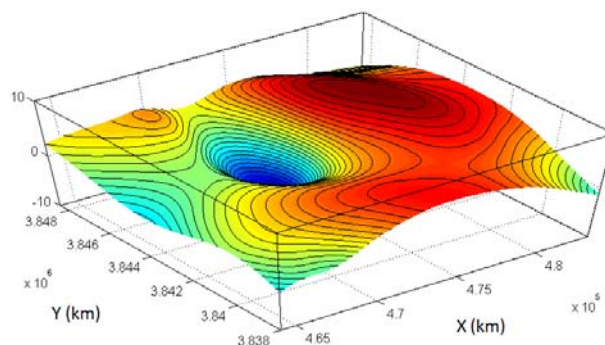
شکل ۷ نتایج اعمال دو روش انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی و متوازن شده آنها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به عمق زیاد این ناهنجاری (مار و کوله، ۲۰۰۶) لبه‌های تعیین شده با دو روش انحناى نیم‌رخ و زاویه کجی کیفیت مطلوبی ندارد. پس از اعمال روش متوازن‌سازی کیفیت لبه‌های ناهنجاری بهبود قابل توجهی یافته است. برای بررسی بیشتر عملکرد روش‌های پیش‌گفته، داده واقعی دیگری مربوط به بخشی از حوضه رسوبی ایران مرکزی شامل یک ساختار نمکی مورد



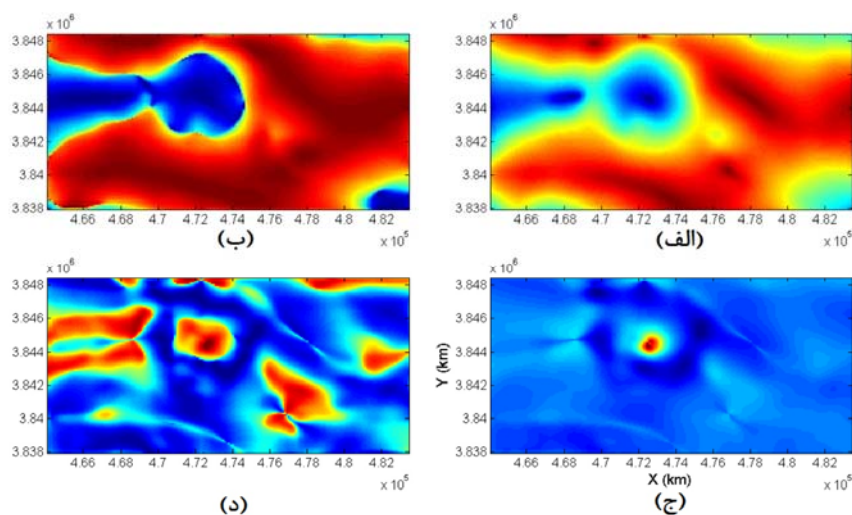
شکل ۷. نتایج تعیین مرز ناهنجاری ترامسبرگ با استفاده از (الف) فیلتر زاویه کجی، (ب) فیلتر زاویه کجی متوازن، (ج) فیلتر انحناى نیم‌رخ و (د) فیلتر انحناى نیم‌رخ متوازن.



شکل ۸. نقشه ماهواره منطقه مورد بررسی (برگرفته از گوگل‌ارت).



شکل ۹. ناهنجاری بوگه مربوط به منطقه نشان داده شده در شکل ۸



شکل ۱۰. نتایج تعیین مرز ناهنجاری مربوط به بخشی از حوضه رسوبی ایران مرکزی شامل یک ساختار نمکی با استفاده از (الف) فیلتر زاویه کجی، (ب) فیلتر زاویه کجی متوازن، (ج) فیلتر انحنای نیم‌رخ و (د) فیلتر انحنای نیم‌رخ متوازن.



## ۶ نتیجه‌گیری

می‌شود.

در این مقاله برای برطرف کردن مشکل حساسیت روش‌های بهبود کیفیت تصاویر میدان پتانسیل از روش متوازن‌سازی استفاده شده است. در این روش تبدیل هیلبرت دو بُعدی تصویر داده‌های میدان پتانسیل برای متوازن‌سازی به کار گرفته شده است. به منظور نشان دادن کارایی روش متوازن‌سازی روی تصاویر حاصل از دو روش متداول انحنای نیم‌رخ و زاویه کجی که به عمق ناهنجاری وابستگی دارند، اعمال شد. نتایج حاصل از داده‌های مصنوعی روشن ساخت که روش پیش‌گفته می‌تواند توازن مطلوبی میان دامنه‌های مربوط به ناهنجاری‌های با اعماق متفاوت ایجاد کند. داده واقعی مورد استفاده مربوط به ناهنجاری عمیق نفوذی گرانیتی ترامپسبرگ است. با توجه به عمق زیاد این ناهنجاری، همان‌طور که انتظار می‌رود، دو روش متداول در تعیین لبه‌ها دچار مشکل می‌شوند. اما استفاده از روش متوازن‌سازی بهبود قابل‌توجهی در کیفیت تصاویر روش‌های متداول ایجاد کرده است. بنابراین از این روش می‌توان به منظور بررسی تصاویر میدان پتانسیل و بررسی ناپیوستگی‌های مربوط به ساختارهای عمیق استفاده کرد.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از جناب آقای پروفسور کوپر و مهندس خراسانی از مدیریت اکتشاف نفت به خاطر فراهم ساختن داده‌های گرانی واقعی مورد استفاده در مقاله، قدردانی

## منابع

- Blumentritt, C. H., Marfurt, K. J. and Sullivan, E. C., 2006, Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations-Early to mid-Paleozoic, Central Basin Platform, west Texas, *Geophysics*, **71**(5), 159-B166.
- Buchmann, J. P., 1960, Exploration of a geophysical anomaly at Trompsburg, orange free state, South Africa, *Transactions of the Geological Society of South Africa*, **63**, 1-10.
- Cooper, G. R. J., 2009, Balancing images of potential-field data, *Geophysics*, **74**, L17-L20.
- Cooper, G. R. J. and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics, *Geophysics*, **73**, H1-H4.
- Mare, L. P. and Cole, J., 2006, The Trompsburg complex, South Africa: a preliminary three dimensional model, *Journal of African Earth Sciences*, **44**, 314-330.
- 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.
- Mitasova, H. and Jarosalav, H., 1993, Interpolation by regularized spline with tension: II-Application to terrain modeling and surface geometry analysis, *Mathematical Geology*, **25**, 657-669.
- Moon, W. M., Ushah, A., Singh, V. and Bruce, B., 1988, Application of 2-D Hilbert transform in geophysical imaging with potential field data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26**, 502-510.
- Phillips, J. D., Hansen, R. O. and Blakely, R. J., 2007, The use of curvature in potential-field interpretation, *Exploration Geophysics*, **38**, 111-119.
- Rajagopalan, S. and Milligan, P., 1995, Image enhancement of aeromagnetic data using automatic gain control, *Exploration Geophysics*, **25**, 173-178.