

استفاده از روش انحراف معیار نرمال شده در برآورد مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل

عبدالحمید انصاری^{۱*}، امیر حسین کوهساری^۱، کمال علمدار^۲ و مهدی یعقوبی مقدم^۳

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد فراوری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۱۶، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵)

چکیده

برآورد مرز در روش‌های میدان پتانسیل نقش مهمی در تفسیرهای زمین‌شناسی دارد. روش‌های زیادی برای برآورد مرز وجود دارد که اکثر آنها از نوع فیلترهای بالاگذر شامل مشتق قائم و افقی هستند. روش آماری انحراف معیار نرمال شده، روش برآورد مرز جدیدی است که از نسبت انحراف معیار مشتقات میدان پتانسیل استفاده می‌کند. در مقایسه با دیگر فیلترها این فیلتر نتایج دقیق‌تری به دست می‌دهد. در این بررسی این روش روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل منشوری و همچنین، روی داده‌های مغناطیس واقعی ناحیه‌ای در سرچشمه رفسنجان به کاررفته و سپس نتایج آن با دیگر فیلترها مقایسه شده است. به منظور بررسی صحت نتایج فیلتر آماری ضخامت ظاهری واحدهای سنگی اصلی منطقه (اندزیت و تراکی اندزیت) از روی نقشه زمین‌شناسی با نتیجه فیلتر آماری مقایسه شد. کاربرد این فیلتر پهنای واحدهای زمین‌شناسی پیش‌گفته را حدود ۱۵۲۰ متر تعیین کرد که در مقایسه با پهنای ۱۴۰۰ متر اندازه‌گیری شده روی زمین، خطایی در حدود ۶/۶۷ درصد ایجاد شده است. در مقایسه با نتایج حاصل از فیلترهای دیگر، فیلتر آماری مرزهای توده را با دقت زیادی و به صورت تیز و پیوسته با اطراف مشخص کرده است.

واژه‌های کلیدی: برآورد مرز، گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، مشتق قائم و افقی، انحراف معیار نرمال شده، سرچشمه رفسنجان

A normalized statistics method in edge detection of potential field anomalies

Abdul-hamid Ansari^{1*}, Amir-hossein Kohsary¹, Kamal. Alamdar¹ and Mehdi Yaghoubi²

¹Mining and Metallurgy Engineering Department, Yazd University, Iran

²Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

(Received: 07 June 2009, accepted: 28 September 2011, available online: 15 March 2012)

Summary

Numerous filters are available to enhance subtle detail in potential field data, such as downward continuation, horizontal and vertical derivatives, and other forms of high-pass filters. A commonly used edge-detection filter is the total horizontal derivative (THD), which is computed as follows:

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

where f is the magnetic or gravity field.

*Corresponding author:

h.ansari@yazduni.ac.ir

*نگارنده رابط:

Miller and Singh (1998) introduced a new filter based on phase variation of the data and called it "Tilt angle filter." Tilt angle is the ratio of the vertical derivative to the absolute value of the total horizontal derivative:

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

The tilt angle is positive when over the source, passes through zero when over or near the edge where the vertical derivative is zero and the horizontal derivative is maximum, and is negative outside the source region. The tilt angle has a range of -90 to +90 degrees.

Since the tilt angle is based on a ratio of derivatives, it enhances large- and small-amplitude anomalies well. However, in the cases where causative bodies are deep, the edges detected by the tilt angle are blurred as hollow. To overcome this problem, Gann et al (2004), in a new approach, suggested using the total horizontal derivative of the tilt angle as an edge detector (THDR):

$$THDR = \sqrt{(\partial T / \partial x)^2 + (\partial T / \partial y)^2} \quad (3)$$

where T is the tilt angle from Eq. 2.

The THDR successfully delineates the edges of the largest amplitude anomaly, but its results for the deeper bodies are less impressive. The theta map (Wijns et al., 2005) uses the analytic signal amplitude to normalize the total horizontal derivative. It is given by

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}}{\sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2 + (\partial f / \partial z)^2}} \quad (4)$$

where f is the potential field data and θ is the theta angle filter.

The windowed computation of the standard deviation of an image is a simple measure of the local variability. It has relatively small values when the data are smooth and relatively large values when they are rough, e.g., over edges. If it is used as an edge detector, the response over large-amplitude gradients will dominate the result, similar to the results of other filters, e.g., the total horizontal derivative. We suggest using a filter based on the ratio of related normalized standard deviations (NSTD) to make large- and small-amplitude edges visible simultaneously:

$$NSTD = \frac{\sigma \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)}{\sigma \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) + \sigma \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) + \sigma \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)} \quad (5)$$

The standard deviations σ in equation 5 are computed using a moving square window of data points. The standard deviation can be computed in a given direction (to preferentially enhance edges normal to that direction).

In this paper, the filters mentioned above were applied to synthetic magnetic data from a prismatic model in both noiseless and noisy conditions. In general, presence of the

disturb noises led to the detected edges being scattered, which appears as an offset between the detected edge and the actual body edge location.

Successive applications of the statistical filter on real magnetic data from the Sar-Cheshme region in Rafsanjan reveal the applicability of this filter. In this regard, we took into consideration the comparison between the main lithological units (Andezite and Trachyandezite) from a simplified geological map of the area and the results associated with the statistical filter. Application of the filter mentioned above determined the width of major geological units to be about 1520 m, which, in comparison with the measured width (1400m), produced an error of 6.67 percent, which is an admissible value.

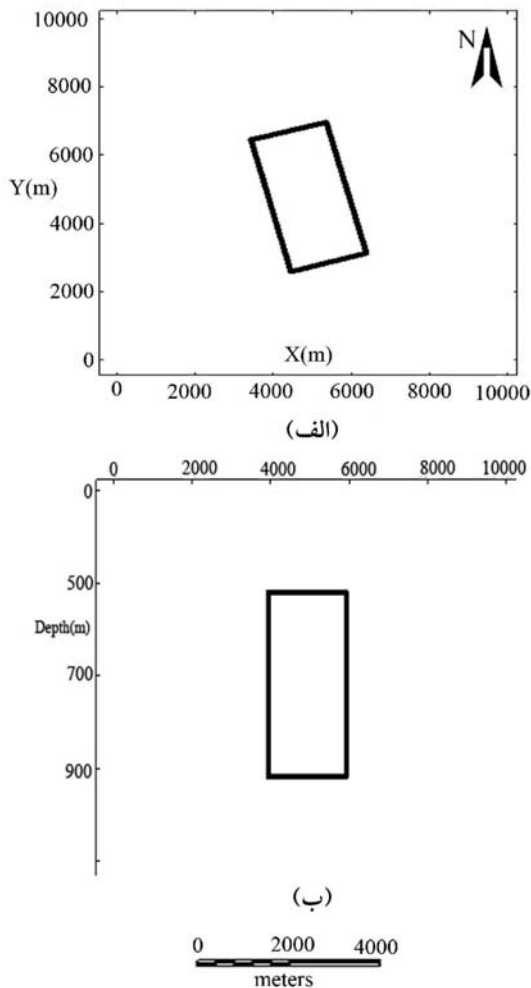
Key words: Edge detection, gravity, magnetic, normalized standard deviation, Sar-Cheshme

۱ مقدمه

مشتق افقی کل زاویه کجی (Tilt) و فیلتر زاویه تنا (زاویه بین مشتق افقی کل و سیگنال تحلیلی) است که بسته به ماهیت داده‌ها و عمق توده، کارایی این فیلترها در برآورد مرز محدود می‌شود (میلر و ساین، ۱۹۹۸). فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده جدیدترین فیلتر برآورد مرز داده‌های میدان پتانسیل است که کارایی به مراتب بهتری نسبت به دیگر فیلترها دارد و در مورد داده‌های مغناطیسی نیازی به انتقال داده‌ها به قطب نیست. در این فیلتر از نسبت بین انحراف معیار گرادیان قائم و انحراف معیار گرادیان افقی داده‌ها استفاده می‌شود. در این نوشتار ضمن شرح دادن این فیلترها، نتایج آنها روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی مدل منشوری و نیز داده‌های مغناطیسی واقعی منطقه‌ای واقع در سرچشمه رفسنجان به کار برده می‌شود. شکل ۱-الف و ب وضعیت قرارگیری مدل منشوری قائم با سطح مقطع مستطیل به ابعاد ۲×۴ کیلومتر را نشان می‌دهد. مدل ذکر شده در عمق ۵۰۰ متری قرار دارد و ضریب خودپذیری آن با اطراف برابر با $۰/۰۱۳$ در دستگاه SI فرض شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود امتداد توده با راستای شمال زاویه ۱۵ درجه می‌سازد. بی‌هنجاری مغناطیسی مدل به ازای زاویه میل و انحراف به ترتیب برابر با ۷۰ و ۱۵ درجه تولید شده است. در شکل ۲ پاسخ مغناطیسی مدل به همراه کاربرد فیلترهای متفاوت روی داده‌های مغناطیسی مدل شکل ۱ داده شده است.

فیلترهای گوناگونی برای برجسته‌سازی و برآورد مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل وجود دارد. فیلترهای برآورد مرز را می‌توان به دو گروه عمده فیلترهای گرادیان و لاپلاس تقسیم کرد (هارنبی و همکاران، ۱۹۹۹؛ بارانو، ۲۰۰۳). فیلترهای گرادیان با جست‌وجوی بیشینه یا کمینه مشتق (گرادیان) مرتبه اول داده‌ها به برآورد مرز می‌پردازند. حال آنکه اساس فیلترهای لاپلاس نقاط صفر مشتق دوم داده‌ها است. اما، صرف‌نظر از شیوه عملکرد فیلترها، پُرکاربردترین آنها در پردازش تصاویر میدان پتانسیل فیلترهای مشتق شامل مشتق قائم و مشتق افقی است که از نوع فیلترهای بالاگذر هستند (بک، ۱۹۸۱؛ کوان و کوپر، ۲۰۰۵). عیب استفاده از این فیلترها این است که هم‌زمان با سیگنال‌ها، نوفه‌های موجود در تصویر فیلتر شده نیز افزایش می‌یابد. دسته‌ای دیگر از فیلترهای مورد استفاده در برآورد مرز، فیلترهای فاز محلی هستند که در آنها تغییرات زاویه فاز داده‌ها در سرتاسر نقشه اندازه‌گیری می‌شود. تفاوت عمده این فیلترها با فیلترهای مشتق در رویکرد محاسباتی آنها است؛ بدین معنی که در فیلترهای فاز محلی به جای تغییرات مقدار مشتق داده‌ها، تغییرات زاویه بین آنها ملاک برآورد مرز است (کوپر و کوان، ۲۰۰۳؛ فدی و فلوریو، ۲۰۰۱). از مهم‌ترین این فیلترها، فیلتر زاویه کجی (زاویه بین مشتق قائم و مشتق افقی کل)،

توده‌های مغناطیسی زیرسطحی مثبت است و در نزدیکی لبه‌های توده جایی که مقدار مشتق افقی حداکثر و میزان مشتق قائم صفر است مقدار زاویه کجی صفر است (پولت و همکاران، ۲۰۰۱). در شکل ۲-ج کاربرد فیلتر زاویه کجی روی بی‌هنجاری مغناطیسی مدل نشان داده شده است. کمینه مقدار این فیلتر (آبی‌رنگ) روی مرز توده قرار خواهد گرفت ولی همان‌طور که در شکل مشخص است، به دلیل عمق زیاد توده، مرزهای توده به صورت پخش و هاله‌مانند مشخص شده است.



شکل ۱. (الف) نقشه مدل منشوری قائم و (ب) مقطع عمودی مدل منشوری قائم. زاویه بین امتداد توده با راستای شمال ۱۵ درجه است.

۱-۱ فیلتر مشتق افقی کل

متداول‌ترین فیلتر در برآورد مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل فیلتر مشتق افقی کل است (بلکلی، ۱۹۹۶). این فیلتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

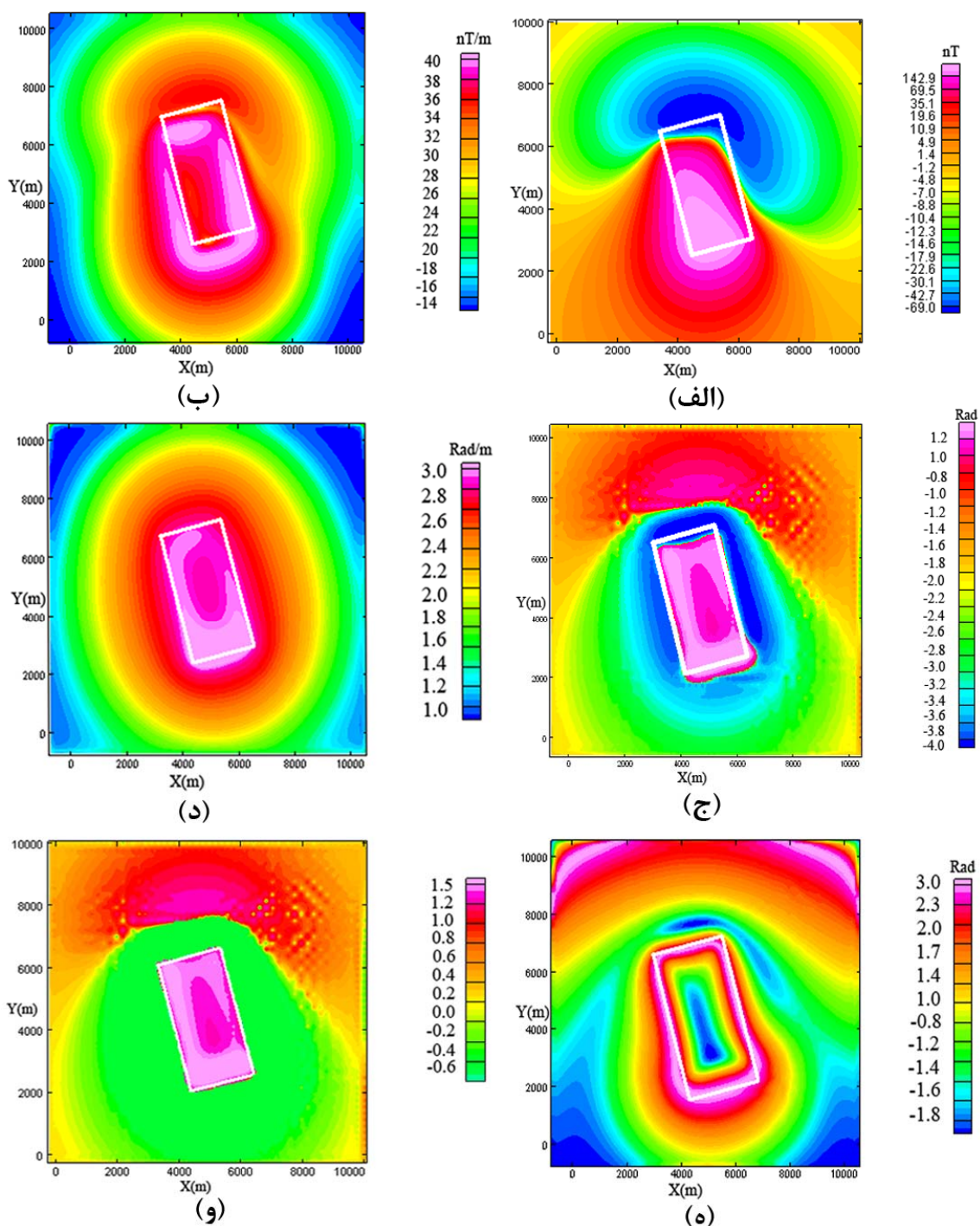
که در آن، f میدان پتانسیل برداشت شده است. شکل ۲-ب فیلتر مشتق افقی کل بی‌هنجاری شکل ۲-الف را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه مقدار گرادیان افقی بیانگر مرزهای توده است، اما، نتایج برآورد مرز از زاویه میل مغناطیس شدگی توده متأثر شده و در نتیجه مرز برآورد شده بر مرز واقعی توده (کادر سفید رنگ) منطبق نیست.

۲-۱ فیلتر زاویه کجی (Tilt)

یکی از فیلترهای فاز پایه متداول در برجسته‌سازی ساختارهای موجود در تصاویر میدان پتانسیل، فیلتر زاویه کجی است. این فیلتر که اولین بار میلر و ساین، (۱۹۹۸) آن را معرفی کردند به صورت نسبت اندازه مشتق قائم به اندازه مشتق افقی کل داده‌های میدان پتانسیل برداشت شده تعریف می‌شود. زاویه کجی طبق رابطه زیر، هم در حوزه بسامد و هم در حوزه مکان به راحتی قابل محاسبه است.

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

که در آن، T ، مقدار زاویه کجی و f میدان پتانسیل برداشت شده (مغناطیس یا گرانی) است. تغییرات زاویه کجی در بالای توده‌های معدنی و همچنین، بدون بُعد بودن آن مهم‌ترین دلیل کاربرد این فیلتر است. در ضمن نتایج آن را می‌توان با نتایج فیلترهای مشتق قائم و مشتق افقی نیز مقایسه کرد. مقدار زاویه کجی مستقیماً در بالای



شکل ۲. کاربرد فیلترهای متفاوت روی بی‌هنجاری مغناطیسی مدل منشوری با سطح مقطع ۲×۴ کیلومتر و در عمق ۵۰۰ متری. زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس‌شدگی توده به ترتیب برابر با ۷۰ و ۱۵ درجه فرض شده است. (الف) پاسخ مغناطیسی مدل منشوری، (ب) تصویر فیلتر مشتق افقی کل داده‌های قسمت (الف)، (ج) تصویر فیلتر زاویه کجی داده‌های قسمت (الف)، (د) تصویر فیلتر مشتق افقی کل زاویه کجی، (ه) تصویر فیلتر زاویه تتا داده‌های قسمت (الف) و (و) تصویر فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده داده‌های قسمت (الف). همان‌طور که ملاحظه می‌شود در مقایسه با سایر فیلترها در این مورد برآورد مرزها با دقت زیادی صورت گرفته است.

دوقطبی آنها حذف شود (کوان و کوپر، ۲۰۰۵). در شکل ۲-ه کاربرد فیلتر تنا روی داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی شکل ۲-الف نشان داده شده است. در مقایسه با فیلترهای قبلی با کاربرد این فیلتر، حدود توده با اطراف بهتر مشخص شده و دقت برآورد مرز بیشتر است.

۲ فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده
تعیین انحراف معیار داده‌های موجود در یک تصویر بر اساس پنجره متحرکی که بر روی تصویر حرکت می‌کند روش ساده‌ای برای اندازه‌گیری تغییرات محلی داده‌ها است. در مناطقی از تصویر که شدت داده‌ها کم است و به اصطلاح داده‌ها هموار هستند، مقدار انحراف معیار نیز کم و در مناطقی از تصویر که شدت داده‌ها زیاد (مطابق با مرزهای توده) است میزان این کمیت نیز زیاد است و بدین ترتیب با محاسبه این کمیت تباینی بین داده‌های متفاوت ایجاد خواهد شد (فدی و فلوریو، ۲۰۰۱). اما، اگر به صورت گفته شده در بالا از این فیلتر استفاده شود، یعنی انحراف معیار داده‌های تشکیل‌دهنده تصویر محاسبه شود، نتایج برآورد مرز دقت چندانی ندارد. به عبارت دیگر تباین کاملی بین داده‌های کم‌شدت و پُرشدت صورت نمی‌گیرد. برای حل این مشکل باید انحراف معیار کمیتی مناسب از داده‌ها محاسبه شود. در این راستا بهترین کمیتی که از داده‌ها قابل محاسبه است و در ضمن به تغییر پذیری داده‌ها نیز بستگی دارد، گرادیان افقی و قائم داده‌ها است. در این روش پنجره‌ای با ابعاد مشخص که از مفسر تعیین می‌شود روی داده‌ها حرکت می‌کند. در هر موقعیت گرادیان افقی و قائم داده‌های محاط در پنجره و همچنین، انحراف معیار گرادیان افقی و قائم داده‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت با رابطه زیر، نسبت بین انحراف معیار گرادیان قائم و انحراف معیار مجموع گرادیان‌های قائم و افقی به منزله فیلتر آماری انحراف معیار

۳-۱ فیلتر مشتق افقی کل زاویه کجی

این فیلتر که با THDR نشان داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید (گان و همکاران، ۱۹۹۷).

$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

که در آن، T زاویه کجی محاسبه شده از رابطه (۲) است. یکی از کاربردهای مهم این فیلتر تعیین مرز توده‌ها است اما، از آنجا که برای محاسبه این فیلتر باید مشتق دوم زاویه کجی محاسبه شود، با توجه به تغییرات شدت داده‌های برداشت شده، ممکن است تصویر فیلتر شده با نوفه زیادی همراه باشد. شکل ۲-د تصویر فیلتر مشتق افقی کل زاویه کجی نشان داده شده است. در این تصویر مقادیر بیشینه بیانگر مرزهای توده هستند اما، باز هم به دلیل عمق زیاد توده، حدود توده با اطراف به‌طور تیز مشخص نشده است.

۴-۱ فیلتر زاویه تنا

این فیلتر به صورت نسبت بین اندازه گرادیان افقی به اندازه سیگنال تحلیلی داده‌های میدان پتانسیل تعریف و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود (وینز و همکاران، ۲۰۰۵):

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2}} \quad (4)$$

که در آن، f میدان پتانسیل برداشت شده است و صورت کسر بیانگر گرادیان افقی کل و مخرج کسر معادل سیگنال تحلیلی (گرادیان کامل) است. در واقع در این فیلتر اندازه گرادیان افقی کل با اندازه سیگنال تحلیلی نرمال شده است. این فیلتر منجر به برآورد مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری میدان پتانسیل می‌شود. محدودیت استفاده از این فیلتر در مورد داده‌های مغناطیسی این است که ابتدا داده‌ها باید به قطب یا استوا منتقل شوند تا ماهیت

اضافه شد. پاسخ مغناطیسی مدل منشوری به همراه نتایج فیلترهای متفاوت در شکل ۳ آمده است. شکل ۳-الف نقشه پاسخ مغناطیسی مدل را در حالت نوفه‌ای نشان می‌دهد. شکل ۳-ب نتیجه فیلتر مشتق افقی کل را روی داده‌های قسمت الف نشان می‌دهد. چون این فیلتر از مشتق مرتبه دوم استفاده می‌کند مشکل برجستگی نوفه کاملاً مشهود است و باعث شده که حدود توده به صورت پخش با اطراف مشخص شود. در شکل ۳-ج نتیجه فیلتر زاویه کجی روی داده‌های قسمت الف آمده است. در مقایسه با شکل ۳-ب دقت برآورد مرز کاهش یافته، به حدی که فقط مرز گوشه شمال غربی توده برجسته شده است. دلیل این امر آن است که در رابطه زاویه کجی، مشتق قائم که از نوع فیلترهای بالاگذر است در صورت کسر وجود دارد و بدین ترتیب همراه با مرز توده، نوفه‌ها نیز برجسته می‌شوند و در بعضی موارد مرزهای برآورد شده را می‌پوشانند. مشکل برجستگی نوفه در مشتقات مرتبه بالاتر در شکل ۳-د کاملاً مشهود است. این شکل مربوط به مشتق افقی کل زاویه کجی است. در این فیلتر نیز از مشتق مرتبه دوم استفاده می‌شود که در نتیجه آن نوفه‌ها کاملاً مرزهای توده را می‌پوشانند. شکل ۳-ه نتیجه فیلتر زاویه تنا را نشان می‌دهد. در این شکل در مقایسه با شکل‌های قسمت ب تا د دقت برآورد مرز بیشتر است. چون طبق رابطه این فیلتر، مشتق افقی کل در صورت و سیگنال تحلیلی در مخرج وجود دارد، لذا، نتایج فیلتر زاویه تنا تا حدی نرمال شده است. در نهایت در شکل ۳-و نتیجه اعمال فیلتر انحراف معیار نرمال شده روی داده‌های قسمت الف نشان داده شده است. در این شکل محدوده توده به طور کامل با اطراف برجسته شده است. اما، وجود نوفه باعث شده تا مرز برآوردی با مرز واقعی مدل (کادر سفید رنگ) منطبق نباشد.

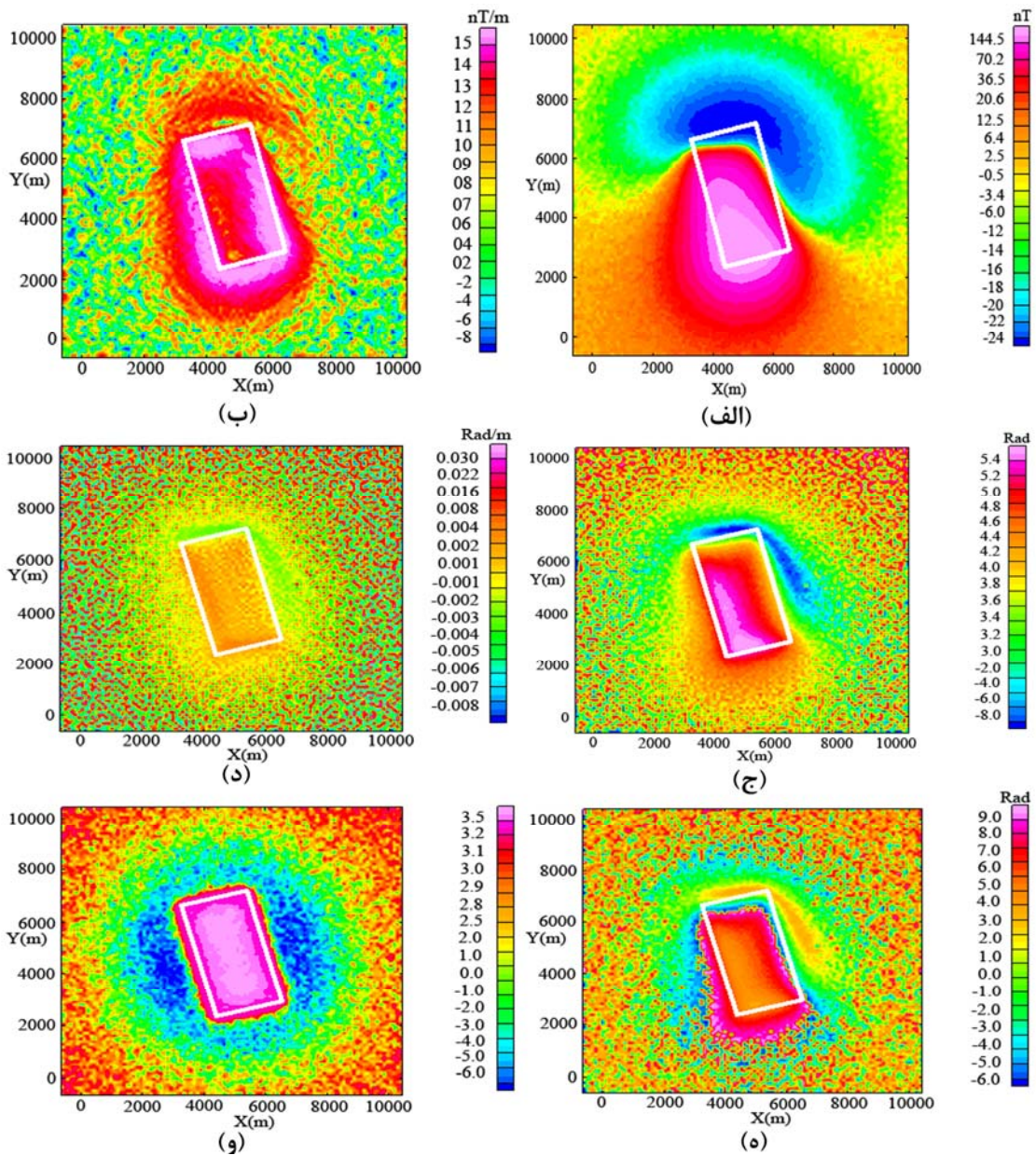
نرمال شده در برآورد مرز محاسبه می‌شود (کوپر و کوان، ۲۰۰۸):

$$NSTD = \frac{\sigma\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)}{\sigma\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right) + \sigma\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right) + \sigma\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)} \quad (5)$$

که در آن، f ، میدان پتانسیل و $\sigma\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)$ ، $\sigma\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)$ و $\sigma\left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)$ به ترتیب بیانگر انحراف معیار گرادیان افقی و قائم داده‌های محاط در پنجره متحرک هستند. برای نتایج مطلوب‌تر، گرادیان داده‌ها در حوزه مکان محاسبه می‌شود.

این روش علاوه بر برآورد مرز توده‌های مولد بی‌هنجاری میدان پتانسیل، در برجسته‌سازی ساختارهای خطی در امتدادی خاص نیز کاربرد دارد. برای این منظور محاسبه انحراف معیار گرادیان افقی و قائم در یک جهت باعث برجسته‌سازی بی‌هنجاری‌ها با امتداد عمود بر این جهت می‌شود. ابعاد پنجره متحرک مورد استفاده نیز در جزئیات به دست آمده از نقشه اهمیت خاصی دارد. ابعاد بزرگ‌تر پنجره ضمن حساس نبودن به نوفه‌های القایی، باعث از دست رفتن بعضی از بی‌هنجاری‌ها می‌شود. در مقابل ابعاد کوچک پنجره مورد استفاده جزئیات بیشتری از تصویر به دست می‌دهد، در حالی که از لحاظ محاسبات وقت گیر است. در شکل ۲-و کاربرد فیلتر انحراف معیار نرمال شده روی داده‌های مدل نشان داده شده است. در این مورد برآورد مرز با دقت زیادی صورت گرفته است. به عبارت دیگر حالت پخش مرزها بر طرف و حدود توده با اطراف به طور تیز مشخص شده است.

به منظور بررسی تأثیر نوفه‌های مزاحم بر نتایج فیلترهای برآورد مرز متفاوت، به ویژه فیلتر انحراف معیار نرمال شده، نوفه‌ای با توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار به ترتیب برابر با ۱ و ۲ به داده‌های مغناطیسی مدل منشوری



شکل ۳. کاربرد فیلترهای متفاوت برآورد مرز روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی مدل منشور قائم در حالت نوفه‌ای. (الف) نقشه پاسخ مغناطیسی مدل منشور قائم که نوفه‌ای با توزیع استاندارد و میانگین و انحراف معیار به ترتیب برابر با ۱ و ۲ به آن اضافه شده است، (ب) نتیجه اعمال فیلتر مشتق افقی کل روی داده‌های قسمت (الف)، (ج) نقشه فیلتر زاویه کجی داده‌های قسمت (الف)، (د) نقشه مشتق افقی کل زاویه کجی، (ه) نقشه فیلتر زاویه تنا داده‌های قسمت (الف)، و (و) نقشه فیلتر انحراف معیار نرمال شده داده‌های قسمت الف. در این شکل حدود توده کاملاً با اطراف برجسته شده اما به دلیل وجود نوفه، مرز برآوردی و مرز واقعی مدل بر هم منطبق نیست.

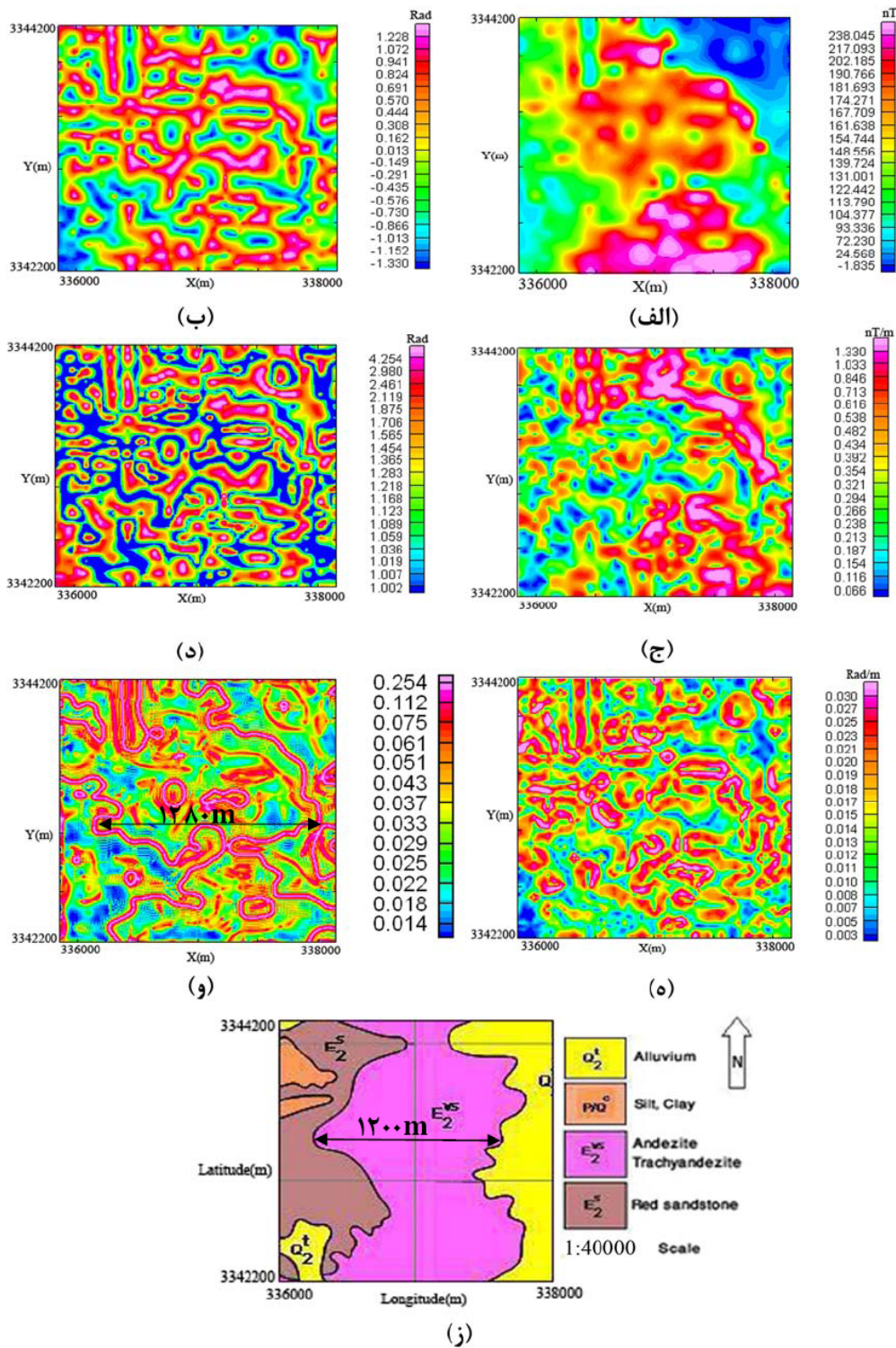
۳ کاربرد روی داده‌های مغناطیس‌سنجی سرچشمه رفسنجان

منطقه موردنظر جزء بلوک زمین‌شناسی رفسنجان و در طول جغرافیایی ۵۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه شمالی قرار گرفته است. منشأ اصلی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی آندزیت‌ها و تراکی آندزیت‌های مربوط به ائوسن است. عملیات مغناطیس‌سنجی در یک شبکه مربعی منظم با فاصله ۱۰۰ متری و در ۲۱ نیم‌رخ شرقی-غربی به طول ۲۰۰۰ متر به منظور تعیین ساختارهای زمین‌شناسی و توده‌های معدنی صورت گرفته است. پس از برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی، نقشه هم‌مقدار مغناطیسی منطقه رسم شد که در شکل ۴-الف آمده است. در شکل ۴-ب نقشه فیلتر زاویه کجی داده‌های مغناطیس‌سنجی نشان داده شده است. در این نقشه کمینه مقدار زاویه کجی روی مرزها قرار گرفته است اما، به دلیل مجاورت توده‌های گوناگون، تفکیک حدود آنها از هم امکان‌پذیر نیست. شکل ۴-ج مربوط به کاربرد فیلتر مشتق افقی کل داده‌های مغناطیسی منطقه مورد بررسی است. در این شکل بیشینه مقدار مشتق افقی روی مرزها قرار گرفته است. شکل ۴-د تصویر فیلتر زاویه تتا داده‌های مغناطیسی قسمت الف را نشان می‌دهد. شکل ۴-ه مربوط به تصویر مشتق افقی کل زاویه کجی است. در این شکل مقادیر بیشینه بیانگر مرزهای توده است ولی به دلیل محاسبه مشتقات مرتبه دوم

نوفه زیادی به تصویر الفاء شده است. در شکل ۴-و تصویر فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده روی داده‌های قسمت الف آمده است. محاسبات با پنجره ای به ابعاد 20×20 متر صورت گرفته است. همان‌طور که مشخص است در این روش حدود بی‌هنجاری با اطراف با دقت زیادی برجسته شده است در ضمن اینکه میزان نوفه القا شده به تصویر نیز حداقل است. دو دلیل عامل حداقل بودن نوفه در نتایج حاصل از این فیلتر است. اول اینکه در این فیلتر از مشتقات مرتبه اول داده‌ها استفاده می‌شود. عامل دوم که عامل هموارسازی نام دارد سبب می‌شود تا نتایج فیلتر آماری نرمال شود. این نرمال‌سازی هم از طریق محاسبه انحراف معیار مقادیر مشتق صورت می‌گیرد و هم اینکه طبق رابطه مربوط به محاسبه این فیلتر، مقادیر مشتق قائم که نقش اصلی برجستگی نوفه‌های محیطی را به عهده دارد، نسبت به مقادیر مشتق افقی نرمال می‌شود. برای برآورد میزان کارایی فیلتر آماری در تعیین حدود واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه، نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ای از منطقه تهیه (شکل ۴-ز) و در آن اندازه پهنای واحدهای اصلی منطقه شامل آندزیت و تراکی آندزیت محاسبه و با مقدار همین طول در نقشه برآورد مرز مربوط به فیلتر آماری مقایسه شد. که نتیجه آن در جدول ۱ آمده است که مقدار خطای حاصل برابر $6/67$ درصد است.

جدول ۱. مقایسه نتیجه برآورد مرز فیلتر آماری در منطقه سرچشمه با نتایج صحرائی.

درصد خطا	شرح	
۶/۶۷	$3 \times (400) = 1200$	پهنای واحد آندزیتی از روی نقشه زمین‌شناسی بر طبق مقیاس (متر)
	$3/2 \times (400) = 1280$	پهنای واحد آندزیتی از روی نقشه برآورد مرز فیلتر آماری بر طبق مقیاس (متر)



شکل ۴. کاربرد روی داده‌های مغناطیس‌سنجی واقعی. (الف) تصویر بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه چشمه قربان رفسنجان، (ب) تصویر فیلتر زاویه کجی داده‌های قسمت (الف)، (ج) تصویر فیلتر مشتق افقی کل داده‌های قسمت (الف)، (د) تصویر فیلتر تنا داده‌های قسمت (الف)، (ه) تصویر فیلتر مشتق افقی کل زاویه کجی، (و) تصویر فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده داده‌های قسمت (الف) محاسبه شده با پنجره‌ای به ابعاد 20×20 متر و (ز) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه محدوده بررسی.

- Beck, A. E., 1981, Physical principles of exploration methods: Macmillan press, London, 73pp.
- Baranov, V., 2003, Edge detection using statistical methods: pseudo-gravimetric anomalies: *Geophysics*, **22** (2), 359-383.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2003, The application of fractional calculus to potential field data: *Exploration Geophysics*, **34**(4), 51-56.
- Cowan, D. R., and Cooper, G. R. J., 2005, Separation filtering using fractional order derivatives: *Exploration Geophysics*, **36**(4), 393 - 396.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2008, The application of normalized statistical to potential field data: *Geophysics* **34**(4), 51-56.
- Fedi, M., and Florio, G., 2001, Detection of potential field source boundaries by enhanced horizontal derivatives method: *Geophysical prospecting*, **49**, 40-58.
- Gunn, P. J., Fitz Gerald, D., Yassi, N. and Dart, P., 1997, New algorithms for visually enhancing airborne geophysical data: *Exploration Geophysics*, **28**, 220-224.
- Hornby, P., Boschetti, F., and Horowitz, F., 1999, Analysis of potential field data in the wavelet domain: *Geophysical Journal International*, **137**, 175-196.
- Miller, H. G., and Singh, V., 1998, Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, **32**, 213-217.
- Poulet, T., D'Escrivan, H., Boschetti, F., Hornby, P., Horowitz, F. G., 2001, New advances in the analysis of potential field data by multiscale edges: ASEG, Brisbane. September.
- Wijns, C., Perez, C., And Kowalczyk, P., 2005, Theta map: edge detection in magnetic data: *Geophysics*, **70**(4), 39- 43.

۴ نتیجه گیری

در این بررسی، فیلتر آماری انحراف معیار نرمال شده به منزله جدیدترین فن برآورد مرز بی هنجاری‌های میدان پتانسیل معرفی شده است. این روش بر مبنای نسبت انحراف معیار گرادیان قائم و افقی داده‌ها در یک پنجره متحرک عمل می‌کند. در مقایسه با دیگر روش‌ها این فیلتر نتایج دقیق‌تری از برآورد مرز توده‌ها به دست می‌دهد. یکی از مزایای این فیلتر در مواقع مواجه شدن با منابع عمیق آشکار می‌شود که در این مورد مرزها حالت هاله به خود نمی‌گیرند. یکی از پارامترهای مؤثر در این نتایج فیلتر ابعاد پنجره مورد استفاده است. هرچه ابعاد پنجره مورد استفاده بزرگ‌تر باشد حساسیت به نوفه کمتر است ولی در عوض بعضی از بی‌هنجاری‌ها از دست خواهد رفت، لذا، انتخاب ابعاد بهینه پنجره ضروری است. این روش روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل منشوری و نیز روی داده‌های مغناطیس سنجی واقعی منطقه سرچشمه رفسنجان به کار برده شده است. در مقایسه با نتایج حاصل از فیلترهای دیگر، فیلتر آماری مرزهای توده را با دقت بیشتری و به صورت تیز و پیوسته با اطراف مشخص کرده است.

منابع

- Blakely, J. R., 1996, Potential theory in gravity and magnetic applications: Cambridge University Press, pp 441.