

برآورد مرز بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با مشتق قائم سیگنال تحلیلی

کمال علمدار^{۱*} و عبدالحمید انصاری^۲^۱ کارشناس ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد^۲ عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: ۸۷/۱/۹، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

چکیده

روش‌های میدان پتانسیل شامل روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی، جزء پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی در زمینه اکتشاف منابع معدنی به شمار می‌روند. در این مقاله روشی با دقت زیاد برای شناسایی و برآورد مرز ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل یا دایک از روی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل معرفی شده است. این روش از مشتقات قائم سیگنال تحلیلی استفاده می‌کند. در مواقعی که چندین توده با ویژگی‌های متفاوت در مجاورت هم قرار دارند و همچنین در مواردی که توده سبب شونده بی‌هنجاری دارای مغناطیس باقی‌مانده ناشناخته است، این روش کاربرد گسترده‌ای دارد. این روش روی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان به کار رفته است و نتایج آن با روش‌های مشتق قائم و مشتق افقی کل مقایسه شده است. با کاربرد این روش، رخنمون توده‌های گرانیته و گسل‌های جداکننده آنها با دقت زیادی مشخص شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، سیگنال تحلیلی، مشتق قائم، مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی، جنوب غرب انگلستان

Edge detection of potential field anomalies using vertical derivative of analytic signal

Alamdar, K.¹ and Ansari, A. H.²¹M.Sc. in mineral exploration, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran²Ph.D. in exploration geophysics, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 28 Jan 2009, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

The analytic signal for magnetic anomalies was initially defined as a “complex field deriving from a complex potential” (Nabighian, 1972). This function can be computed easily in the frequency domain, its real part is the horizontal derivative of the field and its imaginary part is the vertical derivative. Analytic signal processing and interpretation requires few initial assumptions regarding the source body geometry and magnetization and is particularly efficient at an early stage of the interpretation even if constraints are not available.

For 2-D structures (Nabighian, 1972), the method assumes that the causative bodies have a polygonal cross-section with uniform magnetization. Such structures can also be considered as the superimposition of a finite number of magnetic steps. Narrow dikes and thin sheets can also be taken into account using a lower order of derivation; for example, the field itself instead of the horizontal derivatives. Nabighian (1972) demonstrates that the analytic signal has simple poles at each corner of the structures. The amplitude of the analytic signal is a bell-shaped symmetric function maximizing exactly over the top of each contact, with the width of the amplitude curve being related directly to the depth of the contact. This is also true for any of the derivatives of the signal (Nabighian, 1974); these properties can be used to locate the magnetic contacts and to estimate their depths.

Extension of the 2-D analytic signal to three dimensions will allow more general interpretation procedures to be developed, the two-dimensionality assumption being no longer required. The relationship between the horizontal and vertical derivatives for the 3-D case was first derived by Nabighian (1984).

As with the 2-D case, the vertical and horizontal derivatives are Hilbert transforms of each other and so the concept of the analytic signal in 2-D can be extended to three dimensions. The analytic signal amplitude can then be defined as “the square root of the squared sum of the vertical and the two horizontal first derivatives of the magnetic field” (Roest et al., 1992).

Because of interference effects, the use of the simple analytic signal in the 3-D case seems insufficient to detect geologic boundaries. Since the existing interference is usually inevitable, improving resolution becomes a requirement. In the 2-D case, Nabighian (1974) suggested using the following bell-shaped function to enhance the analytic signal from shallow sources:

$$\left(\frac{\partial^n G_h}{\partial h^n}\right) + \left(\frac{\partial^n G_z}{\partial h^n}\right) = \frac{(1^2 \times 2^2 \times 3^2 \times \dots \times n^2) \alpha^2}{(d^2 + h^2)^{n+1}}, \quad (1)$$

where G_h and G_z are the horizontal and vertical gradients of the potential-field anomaly, respectively; h is the distance along the horizontal axis which is perpendicular to the strike of the 2-D structure; n is a positive integer; d is the depth to the top surface of the source, while the lower surface is at infinity; α is the ambient parameter and is equal to $\alpha = 2KFc \sin \theta$ when the step model of magnetic anomaly is applied; k is the susceptibility contrast of the step model; F is the earth's magnetic field magnitude; θ is the dip angle of the step model; $c = 1 - \cos^2 i \sin^2 \psi$ for total magnetic field anomalies; i is the inclination of the earth's magnetic field; and ψ is the angle between magnetic north and positive h -axis. All the above parameters are presented in Fig. 1.

In the 3-D case, the simple analytic signal is defined in Nabighian (1984) as:

$$AS_0(x, y) = \frac{\partial G}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial G}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial G}{\partial z} \hat{z}, \quad (2)$$

and its amplitude as:

$$|AS_0(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2}, \quad (3)$$

To extend equation (1) into the 3-D case, we define the n^{th} -order enhanced analytic signal as:

$$AS_n(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n}\right) \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n}\right) \hat{y} + i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n}\right) \hat{z}, \quad (4)$$

and its amplitude as:

$$|AS_n(x, y)| = \sqrt{\left(\nabla^n G_x\right)^2 + \left(\nabla^n G_y\right)^2 + \left(\nabla^n G_z\right)^2}, \quad (5)$$

For $n = 2$, equation (4) corresponds to the enhanced analytic signal derived from second vertical derivative, and the amplitude of equation (5) becomes:

$$|A_2(x, y)| = \sqrt{\left(\nabla^2 G_x\right)^2 + \left(\nabla^2 G_y\right)^2 + \left(\nabla^2 G_z\right)^2}, \quad (6)$$

where G is the potential-field anomaly and $\nabla^n = \frac{\partial^n}{\partial z^n}$, $G_x = \frac{\partial G}{\partial x}$, $G_y = \frac{\partial G}{\partial y}$, $G_z = \frac{\partial G}{\partial z}$.

Equation (6) is used hereafter as an example to demonstrate the improvement of the

detection of geologic boundaries. In this paper the applicability of this method is demonstrated on synthetic gravity data from the vertical cylinder model. Also this method was applied on real gravity data from southwest England successfully. In this regard the granites bodies and their separating faults have been enhanced in which the results of our method have broad correlation with the geological map.

Key words: Potential field, Analytic signal, Vertical derivative, Magnetic, Gravity, Anomaly, Southwest England.

۱ مقدمه

همکاران، ۱۹۹۸) برای حل این مشکل با توجه به اینکه مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر می‌کند، از مشتقات قائم مرتبه بالاتر سیگنال تحلیلی در حوزه بسامد استفاده کردند. در این زمینه بهترین مرتبه مشتق قائم، مرتبه دوم سیگنال تحلیلی است. در این نوشتار این روش در حوزه مکان روی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان به کار رفته است.

۲ برآورد مرز توده‌ها با مشتق قائم سیگنال تحلیلی

روش‌های خودکار و نیمه‌خودکار متفاوتی برای تعیین مشخصات هندسی (شامل مرزها و عمق) توده‌های مولد بی‌هنجاری میدان پتانسیل گسترش یافته‌اند. اساس اکثر این روش‌ها استفاده از مشتق قائم و افقی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل است. موفقیت و دقت نتایج به دست آمده از روش‌های گوناگون، تابع فرض‌های به کار رفته در این روش‌ها است و هر روش معایب و مزایایی دارد. برای مثال مزیت استفاده از تابع سیگنال تحلیلی در تفاسیر، نبود نیاز به آگاهی از پارامترهای بردار مغناطیس زمین و همچنین بردار مغناطیس توده است. این گونه فرض‌ها در مواقعی که تشخیص مغناطیس‌شدگی باقی‌مانده و القایی غیرممکن است، بسیار مفید است (هسو و همکاران، ۱۹۹۸).

به خاطر وجود اثر تداخل توده‌های گوناگون مولد بی‌هنجاری که در مجاورت هم قرار دارند، استفاده از سیگنال تحلیلی ساده به‌منظور برآورد مرز، نامناسب است (هسو و همکاران، ۱۹۹۸). برای حل این مشکل از مشتقات

روش‌های گوناگونی برای برآورد مرز ساختارهای زمین‌شناسی (گسل، دایک و مانند آن) از روی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل وجود دارد. در همه این روش‌ها، از تغییرات یک کمیت در سرتاسر نقشه و به‌خصوص در نواحی توده استفاده می‌شود (نیقیان، ۱۹۷۲؛ کردل، ۱۹۷۹؛ بلکلی و سیمپسون، ۱۹۸۶). در این زمینه مناسب‌ترین کمیت، محاسبه گرادیان داده‌های میدان پتانسیل شامل گرادیان افقی و قائم است. با محاسبه گرادیان افقی داده‌ها بیشینه مقدار آن در بالای لبه‌های توده مولد بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و بدین صورت تباینی بین توده و دیگر قسمت‌های نقشه ایجاد می‌شود. استفاده از فیلتر مشتق قائم یکی دیگر از روش‌های برآورد مرز است. مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر و موقعیت بی‌هنجاری‌ها را با دقت بیشتری مشخص می‌کند (کوپر و کوان، ۲۰۰۴). در این روش کمینه مقدار مشتق قائم روی مرزهای توده قرار می‌گیرد. سیگنال تحلیلی ترکیبی از گرادیان افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل است که بیشینه مقدار آن روی لبه‌های توده قرار می‌گیرد (نیقیان، ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴). مزیت استفاده از این روش وابسته نبودن اندازه سیگنال تحلیلی به مشخصات بردار مغناطیس‌شدگی توده و همچنین بردار مغناطیس زمین است (نیقیان، ۱۹۷۲ و ۱۹۷۴؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲). باین‌حال هنگامی که توده‌های سبب‌شونده با پارامترهای متفاوت در مجاورت هم قرار گیرند، تفکیک بین مرز توده‌ها صورت نمی‌گیرد (گراچ و کردل، ۱۹۸۷). (هسو و

در حالت سه‌بُعدی سیگنال تحلیلی ساده ($A_0(x, y)$) میدان پتانسیل G از رابطه زیر محاسبه می‌شود (نیقیان، ۱۹۷۴؛ بلکلی، ۱۹۹۶):

$$AS_0(x, y) = \frac{\partial G}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial G}{\partial y} \hat{y} + i \frac{\partial G}{\partial z} \hat{z} \quad (۲)$$

و اندازه سیگنال تحلیلی ساده نیز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$|AS_0(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial z}\right)^2} \quad (۳)$$

با تعمیم رابطه (۱) برای حالت سه‌بُعدی، محاسبه مشتق مرتبه n از سیگنال تحلیلی ساده با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید (هسو و همکاران، ۱۹۹۶):

$$AS_n(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n} \right) \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n} \right) \hat{y} + i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n G}{\partial z^n} \right) \hat{z} \quad (۴)$$

اگر رابطه فوق به شکل زیر بازنویسی شود:

$$AS_n(x, y) = \frac{\partial^n}{\partial z^n} \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right) \hat{x} + \frac{\partial^n}{\partial z^n} \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right) \hat{y} + i \frac{\partial^n}{\partial z^n} \left(\frac{\partial G}{\partial z} \right) \hat{z}$$

آن‌گاه می‌توان اندازه رابطه (۴) را از رابطه زیر محاسبه کرد (هسو و همکاران، ۱۹۹۶):

$$|AS_n(x, y)| = \sqrt{\left(\nabla^n G_x\right)^2 + \left(\nabla^n G_y\right)^2 + \left(\nabla^n G_z\right)^2} \quad (۵)$$

که در این رابطه $G_x = \frac{\partial G}{\partial x}$ ، $G_y = \frac{\partial G}{\partial y}$ ، $G_z = \frac{\partial G}{\partial z}$ و $\nabla^n = \frac{\partial^n}{\partial z^n}$ اندازه مشتق قائم مرتبه n سیگنال تحلیلی است.

برای به دست آوردن اندازه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی در رابطه (۵) مقدار n مساوی با ۲ انتخاب می‌شود:

$$|A_2(x, y)| = \sqrt{\left(\nabla^2 G_x\right)^2 + \left(\nabla^2 G_y\right)^2 + \left(\nabla^2 G_z\right)^2} \quad (۶)$$

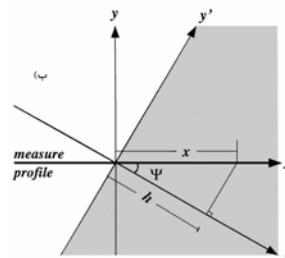
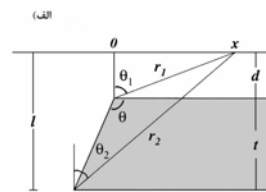
در این نوشتار همه مشتقها در حوزه مکان محاسبه می‌شوند که مزیت آن القاء نشدن نوفه به فیلتر سیگنال

مرتبه بالاتر سیگنال تحلیلی استفاده می‌شود که استفاده از مشتق مرتبه دوم بهترین نتایج را به دست می‌دهد. برای حالت دو بُعدی می‌توان از تابع زنگوله‌ای زیر برای به دست آوردن مشتقات بالاتر سیگنال تحلیلی استفاده کرد (نیقیان، ۱۹۷۴):

$$\left(\frac{\partial^n G_h}{\partial h^n}\right) + \left(\frac{\partial^n G_z}{\partial h^n}\right) = \frac{(1^2 \times 2^2 \times 3^2 \times \dots \times n^2) \alpha^2}{(d^2 + h^2)^{n+1}} \quad (۱)$$

در این رابطه G_z و G_h به ترتیب گرادیان افقی و قائم داده‌های میدان پتانسیل هستند. h فاصله‌ای در طول محور افقی است که عمود بر امتداد توده دو بُعدی اندازه‌گیری می‌شود. n عددی مثبت است که مرتبه مشتق را تعیین می‌کند. d عمق تا توده است (و کف توده در بی‌نهایت فرض می‌شود).

برای مدل پله‌ای (Step model)، K ضریب خودپذیری مغناطیسی توده، F بردار مغناطیس زمین، θ زاویه شیب مدل پله‌ای، $\psi = 1 - \cos^2 i \sin^2 \psi$ که i زاویه میل بردار مغناطیس زمین و ψ زاویه بین شمال مغناطیسی و محور h است. همه پارامترهای فوق در شکل (۱) نشان داده شده است (هسو و همکاران، ۱۹۹۸).

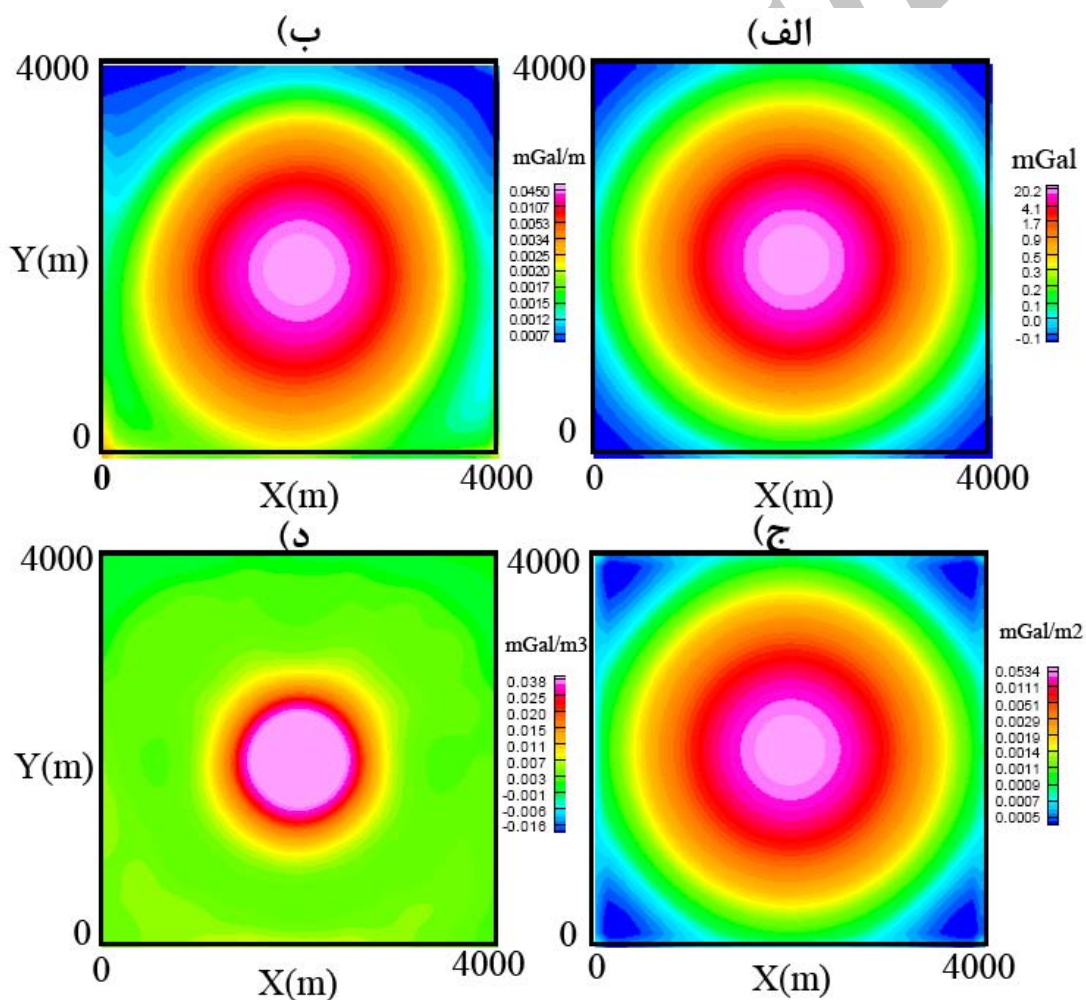


شکل ۱. الف) مقطع دو بُعدی مدل پله‌ای. ب) نقشه مدل پله‌ای (هسو و همکاران، ۱۹۹۶).

برآورد مرز توده مدل با استفاده از سیگنال تحلیلی ساده (رابطه ۲) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در این روش مرز توده‌ها به صورت هاله مشخص شده است به طوری که مرز توده با مجاور به صورت آشکار، مشخص نیست. در شکل (۲،د) برآورد مرز توده‌ها با استفاده از روش مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی صورت گرفته است. در این مورد مرز برآورد شده دارای دقت و وضوح بیشتری است به طوری که حدود توده با اطراف برجسته شده است.

تحلیلی است. برای برآورد مرز توده‌های مغناطیسی از رابطه (۶) استفاده می‌شود در این صورت بیشینه مقدار آن روی لبه‌های توده قرار خواهد گرفت.

شکل (۲) کاربرد روش را روی بی‌هنجاری گرانی مدل استوانه قائم نشان می‌دهد. شکل (۲،الف) پاسخ گرانی مدل را نشان می‌دهد. مدل در عمق ۵۰۰ متری قرار دارد و داده‌ها در یک شبکه ۱۰×۱۰ تولید شده‌اند. در شکل (۲،ب) نقشه مشتق افقی کل داده‌های گرانی مدل آمده است که بیشینه مقدار آن روی مرز قرار گرفته است اما تشخیص حدود توده از اطراف دشوار است. شکل (۲،ج)

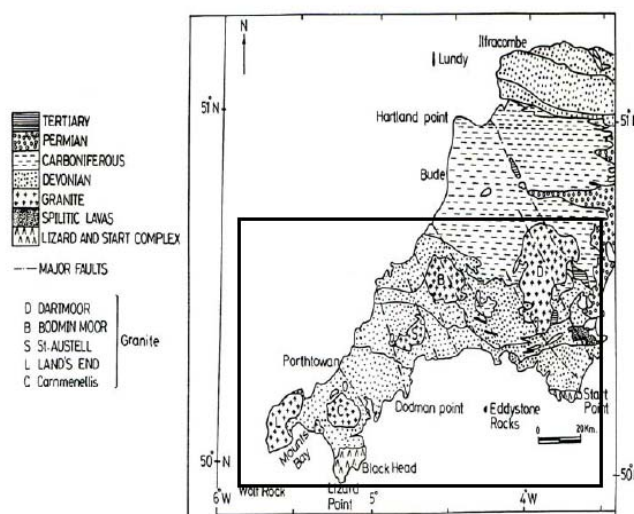


شکل ۲. الف) پاسخ گرانی توده مدل استوانه قائم در عمق ۵۰۰ متری. ابعاد تصویر ۵۰۰×۵۰۰ متر است. ب) نقشه مشتق افقی کل داده‌های گرانی قسمت الف. در این شکل مرزها به صورت متداخل با اطراف برآورد شده است. ج) نقشه سیگنال تحلیلی ساده داده‌های گرانی قسمت الف. د) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی. در این شکل حدود توده با اطراف با دقت زیادی مشخص شده است.

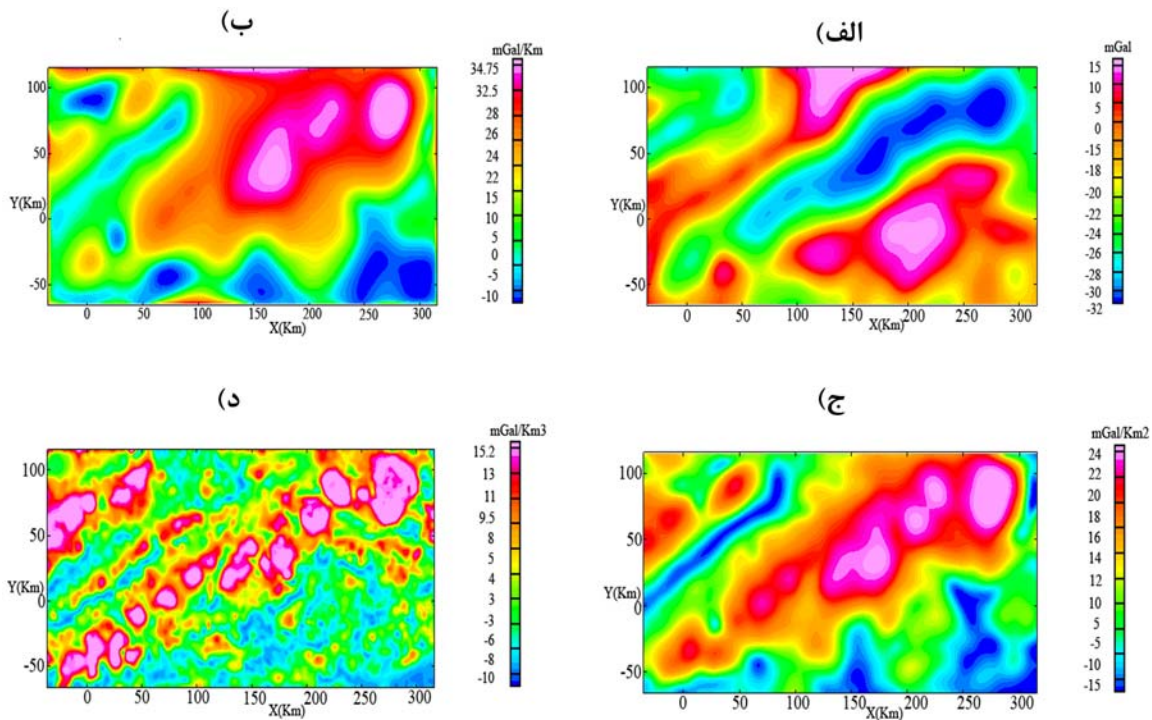
۳ کاربرد روی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان

نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد بررسی در شکل (۳) آمده است. گوشه ضلع جنوب غربی انگلستان رشته‌کوه کورنوبین (Cornubian Massif) خوانده می‌شود که از سمت شمال و جنوب به ترتیب با دریاهای کلتیک (Celtic Sea) و کانال انگلیسی (English Channel) محصور شده است. در این رشته پنج رخنمون اصلی گرانیته از منطقه دارتمور (Dartmoor) تا جزایر سیلی (Scilly Isles) وجود دارد. همچنین تعدادی رخنمون کوچک و با شکل نامنظم دیگر نیز وجود دارد. جزایر سیلی و سون استون (Seven Stone) متشکل از توده‌های گرانیته هستند که در ادامه رشته‌کوه پیش‌گفته در دریا قرار گرفته‌اند (سایین و اسلینگ، ۱۹۶۹). در همه موارد گرانیته‌ها در اسلیت‌های خاکستری دونین و کربنیفر نفوذ کرده‌اند. این باتولیت‌های گرانیته باعث ایجاد یک بی‌هنجاری منفی بزرگ با روند شمال شرقی - جنوب غربی شده‌اند که ناشی از چگالی کم گرانیته است (انصاری، ۲۰۰۲). براساس تعیین سن رادیومتری صورت گرفته، باتولیت‌های گرانیته در اواخر کربنیفر و اوایل

پرمین در طبقات پالئوزوئیک فوقانی نفوذ کرده‌اند (شکلتن و همکاران، ۱۹۸۲). باتولیت گرانیته جنوب غرب انگلستان قبلاً با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی مدل‌سازی شده است. براین اساس پهنای توده گرانیته در سطح زمین حدود ۱۰ کیلومتر و بین ۳۰ تا ۵۰ کیلومتر در قاعده است و قاعده آن در عمق بین ۱۰ تا ۱۲ کیلومتری قرار گرفته است (بوت و همکاران، ۱۹۵۸ و ۱۹۷۰؛ ادوارد، ۱۹۸۴؛ انصاری، ۲۰۰۲). در شکل (۴، الف) نقشه هم‌مقدار گرانیته ناحیه نشان داده شده است. بی‌هنجاری منفی با روند شمال شرقی - جنوب غربی منطبق بر گرانیته‌های یاد شده است که پنج رخنمون از آنها در نقشه زمین‌شناسی منطقه نشان داده شده است. در شکل (۴، ب) نقشه مشتق افقی کل داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان آمده است. در این شکل بیشینه مقدار مشتق روی محدوده گرانیته‌ها قرار گرفته است اما جدایشی بین توده‌های گرانیته متفاوت و همچنین گسل‌های جداکننده آنها وجود ندارد. هدف از کاربرد فیلتر سیگنال تحلیلی و فیلترهای مشتق شده از آن مانند مشتق قائم مرتبه اول و دوم سیگنال تحلیلی، برآورد مرز و تفکیک رخنمون گرانیته‌ها و گسل‌های جداکننده آنها است.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده شده جنوب غرب انگلستان (کادر مشکی موقعیت برداشت‌های گرانی‌سنجی را نشان می‌دهد).



شکل ۴. کاربرد روش مشتق قائم سیگنال تحلیلی در برآورد مرز داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان. الف) نقشه هم‌مقدار گرانی جنوب غرب انگلستان. ب) نقشه مشتق افقی کل داده‌های گرانی جنوب غرب انگلستان؛ کاربرد این فیلتر محدوده گرانی‌ها را مشخص می‌کند، اما تفکیکی بین توده‌های گرانی و موقعیت گسل‌های موجود صورت نمی‌گیرد. ج) نقشه مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان. د) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان. رخنمون توده‌های گرانی و گسل‌های موجود در منطقه با دقت قابل قبولی مشخص شده است.

است. در نقشه‌های مشتق افقی کل و مشتق قائم به ترتیب بیشینه مقدار و کمینه مقدار مشتق، فقط محدوده کلی گرانی‌ها را مشخص می‌کند و تفکیکی بین توده‌های متفاوت و گسل‌های بین آنها صورت نمی‌گیرد. در نقشه سیگنال تحلیلی ساده نیز حدود این توده‌ها مشخص نیست اما از آنجا که مشتق قائم عرض بی‌هنجاری‌ها را باریک‌تر می‌کند، با محاسبه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی حدود و موقعیت رخنمون پنج توده گرانی و گسل‌های جداکننده آنها با دقت زیادی برآورد شده است که با شواهد موجود در نقشه زمین‌شناسی منطقه مطابقت دارد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه یزد به خاطر فراهم آوردن امکانات مورد نیاز این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

در شکل (۴، ج) نقشه مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی داده‌های گرانی قسمت الف آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل مجاورت توده‌های گرانی با استفاده از سیگنال تحلیلی ساده تفکیک بین آنها صورت نمی‌گیرد. در شکل (۴، د) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی آمده است. با افزایش مرتبه مشتق قائم تفکیک بین توده‌های گرانی با دقت بیشتری صورت می‌گیرد به طوری که رخنمون گرانی‌ها و گسل‌ها با نقشه زمین‌شناسی منطقه مطابقت کامل دارد.

۴ نتیجه‌گیری

در این نوشتار برای برآورد مرز پنج توده گرانی جنوب غرب انگلستان و گسل‌های جداکننده آنها از فیلترهای مشتق افقی کل و سیگنال تحلیلی استفاده شده

منابع

- Nabighian, M. N., 1974, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: *Geophysics*, **49**, 780-786.
- Roest, W. R., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *57*, 116-125.
- Shackelton, R. M., Ries, A. C. and Coward, M. P., 1982, Interpretation of the Variscan Structures in SW England: *Journal of the geological Society, London*, 533-541.
- Sabine, P. A., Snelling, N. J., 1969, the Seven Stone granite between Lands end and the Scilly Isles: *Proc. Geol. Soc. Lon.*, 47-50.
- Ansari, A. H., 2002, Geophysical investigations of the southwest British Isles, Unpublished PhD thesis: University of Bristol, UK.
- Bott, M. H. P., Day, A. A. and Masson-Smith, D; 1958, The geological interpretation of gravity and magnetic surveys in Devon and Cornwall, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 251A, 161-91.
- Bott, M. H. P., Holder, A. P., Long, R. E., and lucas, A. L., 1970, Crustal structure beneath the granites of southwest England, 93-102 in *Mechanism of igneous intrusion*, Newall, G., and Rast, N(editors), *Geological Journal Special Issue, No.2*.
- Blackly, R. J. and Simpson, R. W., 1986, Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: *Geophysics*, **51**, 1494-1498.
- Blakely, R. J., 1996, *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*: Cambridge University Press, 441 pp.
- Cordell, L., 1979, Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe country and Espanola Basin, *New Mexico Geol. Soc. Guidebook, 30th Field Conf.*, 59-64.
- Cooper, G. R. J., Cowan, D. R., 2004, Filtering using variable order vertical derivatives: *Computer and Geosciences*, **30**, 455-459.
- Edwards, J. W. F., 1984, Interpretation of seismic and gravity surveys over the eastern part of the Cornubian platform, 119-124 in *Variscan tectonics of the North Atlantic region*, Hutton, D. H. W. and Sanderson, D. H. (Editors): *Geological Society Special publication, No.14*.
- Grauch, V. J. and Cordell, L., 1987, Limitations of determining density or magnetic boundaries from horizontal gradient of gravity or pseudogravity data: *Geophysics*, **52**, 118-124.
- Hsu, S. K., Sibuet, J. C., Shyu, C. T., 1996b, Depth to magnetic source using generalized analytic signal: *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Hsu, S. K., Coppense, D., Shyu, C. T., 1998, High-resolution detection of geologic boundaries from potential field anomalies, An enhanced analytic signal technique: *Geophysics*, **61**, 1947-1957.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, **37**, 507-517.