

## تراس بندی در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل

عبدالحمید انصاری<sup>۱</sup>، کمال علمدار<sup>۲\*</sup> و ابوالقاسم کامکار روحانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، ژئوفیزیک اکتشافی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران  
<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(دریافت: ۸۹/۲/۱۳، پذیرش نهایی: ۹۰/۷/۱۹)

### چکیده

تراس بندی یکی از روش‌های تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است که کاربرد آن روی داده‌های میدان پتانسیل باعث ایجاد محدوده‌هایی است که در هر محدوده شدت میدان فیزیکی اندازه‌گیری شده ثابت است و حدود آنها با اطراف با مرزهای تیز برجسته می‌شود. تراس بندی با محاسبه انحنای داده‌ها در حالت دو و سه بُعدی صورت می‌گیرد. محاسبه انحنای داده‌ها با استفاده از عملگر لاپلاس و با روش‌های تقریبی به انجام می‌رسد. مشکل استفاده از روش‌های تقریبی این است که گوشه‌های بی‌هنجاری حالت گردشگری به خود می‌گیرند. همچنین در مواردی که توده‌های مجاور هم‌پوشانی دارند حدود آنها در نقشه تراس بندی شده، متداخل خواهد بود. در این نوشته برای حل این دو مشکل از روش "انحنای نیم‌رخ" استفاده شده است. برخلاف روش قبلی که انحنای در جهت‌های شرقی-غربی و شمالی-جنوبی محاسبه می‌شود در روش جدید، محاسبه انحنای نیم‌رخ فقط در امتدادی که داده‌ها بیشترین شدت دارند صورت می‌گیرد. در این مقاله این روش روی داده‌های گرانی و مغناطیسی مدل‌های مصنوعی پیچیده و همچنین روی گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان به کار برده شده است.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، تراس بندی، لاپلاس، انحنای نیم‌رخ، جنوب غرب انگلستان

## Terracing in interpretation of the potential field data

Ansari, A.<sup>1</sup>, Alamdar, K.<sup>2</sup> and Kamkar Rouhani, A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor in exploration geophysics, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran

<sup>2</sup> PhD student of mineral exploration, Mining, Petroleum and Geophysics department, Shahrood University of Technology, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Mining, Petroleum and Geophysics department, Shahrood University of Technology, Iran

(Received: 03 May 2010, Accepted: 11 Oct 2011)

### Abstract

Terracing is an operator that is applied to potential field data to produce regions of constant field amplitude that are separated by sharp boundaries. Magnetic data are usually transformed into pseudo-gravity data (Baranov, 1957) prior to the application of terracing. The objective of terracing is 'to recast potential field maps into a geologic map like format' (Cordell and McCafferty 1989). Terracing is performed by moving a window through the data and computing the curvature at each point. The curvature of the field  $f$  is calculated using a three coefficient numerical approximation to the Laplacian derivative operator, which for profile data is given by:

$$L_D = \frac{d^2 f}{dx^2}$$

(Scaling factors relating to the data sampling interval are unimportant here and have been ignored). The output value (located at the centre of the window) takes on one of three possible values. It becomes the value at the centre of the window, if this is greater than or lower than the rest of the data values in the window. If the curvature is positive, then the output value is set to the minimum of the data values in the window, while if it is negative then the output value is set to the maximum of the data values in the window. Terracing is performed in an iterative manner, with the data being sharpened progressively.

Cordell and McCafferty (1989) found that the terracing algorithm tended to square off the corners of anomalies, resulting in ragged domain boundaries. To compensate for this they computed the total horizontal derivative of the data and then tracked its local maxima using the algorithm of Blakely and Simpson (1986). These ridges were then overlain on the terraced data. The problem of the square boundaries is due to the fact that the calculation of the Laplacian function is only numerically approximated.

We propose that the problem of square domain boundaries was due to the curvature of the data being computed using a directionally biased approximation to the Laplacian and that it can be solved by using instead the profile curvature, which is the curvature computed in the direction of steepest ascent at each point of the data. Note that because both the Laplacian derivative operator and the profile curvature use the second horizontal derivatives of the data they are prone to noise problems and data may benefit from smoothing prior to their computation.

The objective of this work was to improve the output of the terracing filter and it was shown (by using both synthetic and real gravity data sets) that this can be achieved if the filter is based on the sign of the profile curvature of the data rather than on the sign of the Laplacian derivative operator. Although both the original and the modified algorithms are sensitive to noise because they use the second horizontal derivatives of the data, the modified algorithm appears to be more robust in this respect.

In this paper this method is applied on synthetic gravity data from adjacent prisms in different depths. Results show that this operator enhances subsurface boundary more accurately than other filters. Also we applied the proposed methods on real gravity data from southwest England. In this region, location of faults and Granite bodies enhanced.

**Keywords:** Potential field, Terracing, Laplace, Profile curvature, Southwest of England

## ۱ مقدمه

تفسیر داده‌های دو بُعدی در امتداد نیم‌رخ مربوط به توده‌های دایکی شکل به کار رفت (نیقیان، ۱۹۷۲، ۱۹۷۴، ۱۹۸۴؛ آتوچا رانو و همکاران، ۱۹۸۱) و در ادامه روئست و همکاران (۱۹۹۲) آن را در تفسیر نقشه‌های مغناطیس‌سنجی توسعه دادند.

بستانی و پدرسون (۲۰۰۱) این تابع را برای برآورد پارامترهای فیزیکی توده‌های دایکی شکل شامل عمق، امتداد، شیب، عرض و مغناطیس‌شدگی به کار بردند. سالم و همکاران (۲۰۰۲) کارایی روش را در تعیین اشیاء

برای برآورد پارامترهای توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی مانند موینت مرزهای توده و عمق تا بالای آن چند روش تفسیر خودکار بر مبنای استفاده از گرادیان‌های میدان مغناطیسی توسعه یافته است. یکی از این روش‌ها شیوه سیگنال تحلیلی است که در اوایل کاربرد خود به صورت تابع مختلط به کار گرفته شد (نیقیان، ۱۹۷۲؛ آتوچا رانو و همکاران، ۱۹۸۱؛ نلسون، ۱۹۸۸؛ پدرسون، ۱۹۸۹؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویلیامز، ۲۰۰۵). تابع سیگنال تحلیلی در ابتدا برای

داده‌های مغناطیسی را با استفاده از روش انحناى نیم‌رخ عملی ساختند.

در مورد داده‌های مغناطیس‌سنجی ابتدا از داده‌ها تبدیل شبه‌گرانی محاسبه می‌شوند و سپس عملگر تراس‌بندی روی آنها اعمال می‌شود (بارانو، ۱۹۵۷؛ بلکلی و سیمسون، ۱۹۸۶؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۴؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۹). هدف اصلی از تراس‌بندی داده‌های میدان پتانسیل، تبدیل آنها به قالب جدیدی شبیه نقشه زمین‌شناسی است. در این مقاله این روش روی داده‌های مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی مصنوعی و همچنین داده‌های مغناطیس و گرانی واقعی به کار برده شده است.

## ۲ نظریهٔ روش

تراس‌بندی با حرکت پنجره‌ای با ابعاد مشخص روی داده‌های میدان پتانسیل و محاسبه انحنای در هر نقطه صورت می‌گیرد (نیقیان و همکاران، ۲۰۰۵). از لحاظ ریاضی انحناى یک منحنی به صورت اندازه نرخ تغییرات شیب خط مماس بر منحنی نسبت به طول کمان تعریف می‌شود. هرچه میزان انحنای در یک نقطه از منحنی بیشتر باشد، منحنی در آن نقطه تیزتر است. انحناى یک منحنی از رابطه زیر به دست می‌آید (گنزالز و وود، ۲۰۰۲):

$$\kappa(s) = \left| \frac{dT}{ds} \right|, \quad (1)$$

که در آن،  $T$  بردار مماس بر منحنی،  $s$  طول منحنی و  $\kappa$  انحنا منحنی است.

مانند آنچه در مورد داده‌های میدان پتانسیل مشاهده می‌شود هنگامی که داده‌ها ماهیت گسسته داشته باشند، از شیوه‌های تقریب عددی برای محاسبه انحنای استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا روشی برای محاسبه گرادیان انتخاب و سپس با استفاده از روش‌های تقریبی میزان انحنای محاسبه می‌شود. برای مثال در این نوشته

مغناطیسی فشرده در بررسی‌های محیط زیست معرفی کردند.

مشتق‌های قائم مرتبه اول و دوم سبب برجستگی بی‌هنجاری‌های کم عمق می‌شوند و می‌توان آنها را در حوزه مکان یا بسامد محاسبه کرد. عملگر مشتق قائم همچنین باعث برجستگی نوفه‌های با بسامد زیاد می‌شود و این از محدودیت‌های آن به شمار می‌رود. برای غلبه بر این مشکل قبل از محاسبات مربوط به مشتق، از الگوریتم‌های بسط داده‌ها استفاده می‌شود. محاسبه مشتق قائم مرتبه اول داده‌ها به صورت پایدار را اولین بار نیقیان (۱۹۸۴) و با استفاده از تبدیل هیلبرت سه‌بُعدی در امتداهای  $X$  و  $Y$  عرضه کرد.

تراس‌بندی (Terracing) عملگری است که روی داده‌های میدان پتانسیل به کار می‌رود و نتیجه آن تولید محدوده‌هایی است که هر محدوده با مرزبندی مشخص و تیز از سایر نواحی جدا می‌شود (کردل و مکافی، ۱۹۸۹). شدت میدان فیزیکی مشاهده‌ای در هر محدوده ثابت است. تراس‌بندی یک روش فیلتر کردن متفاوت برای داده‌های مغناطیس‌سنجی (یا گرانی) شبکه‌بندی شده است (کوپر و کوان، ۲۰۰۹). این فیلتر به طور تدریجی شیب مشتق اول داده‌ها را افزایش می‌دهد و به طور هم‌زمان میدان (مغناطیسی یا گرانی) بین مشتق‌ها را پهن و هموار می‌کند (کوپر و کوان، ۲۰۱۰). نقشه حاصل از تراس‌بندی شبیه یک چشم‌انداز (منظره) تراس‌بندی شده (پلکانی) (Terraced landscape) به همین خاطر این نام برای این روش انتخاب شده است (نیقیان و همکاران، ۲۰۰۵). هنگامی نقشه تراس‌بندی شده به صورت نقشه رنگی که با منبع نورانی از بالا نورانی شده (روش‌های سایه‌روشن) داده شود، بسیار شبیه نقشه زمین‌شناسی است که در آن رنگ‌ها بیانگر مغناطیس‌شدگی نسبی واحدهای زمین‌شناسی هستند. کوپر و کوان (۲۰۰۹) تراس‌بندی

گرایان داده‌ها با استفاده از عملگر مشتق لاپلاس مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود (میتاسوا و جارسالو، ۲۰۰۵):

$$L_{1D} = \frac{d^2 f}{dx^2}, \tag{2}$$

که در آن،  $L_{1D}$  عملگر لاپلاس یک‌بُعدی،  $f$  داده‌های میدان پتانسیل (در مورد داده‌های مغناطیسی داده‌های تبدیل شبه‌گرانی) و  $x$  راستای نیم‌رخ برداشت داده‌ها است. در نهایت انحنا با استفاده از یک تقریب سه نقطه‌ای همانند فیلتر زیر تعیین می‌شود:

جدول ۱. تقریب سه نقطه ای مورد استفاده در محاسبه انحنا داده‌ها در حالت یک‌بُعدی.

-۰/۲۵	۰/۵	-۰/۲۵
-------	-----	-------

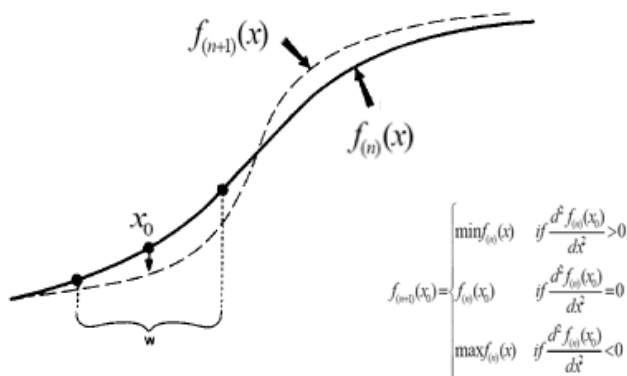
عملیات تراس‌بندی با حرکت پنجره متحرک فوق روی داده‌های میدان پتانسیل صورت می‌گیرد. سپس برای هر نقطه (داده میدان پتانسیل)، مرکز پنجره روی این نقطه قرار می‌گیرد و بسته به مقدار و علامت انحنا محاسبه شده، مقدار میدان پتانسیل مربوط به مرکز پنجره افزایش یا کاهش می‌یابد و یا بدون تغییر رها می‌شود. برای مثال برای حالت یک‌بُعدی پنجره فوق روی داده‌های میدان پتانسیل  $f$  حرکت می‌کند و مرکز آن بر نقطه انتخابی قرار

می‌گیرد و هریک از ضرایب فوق در مقدار متناظر داده‌ها ضرب و ۳ مقدار حاصل با یکدیگر جمع می‌شوند و عدد حاصل به‌مثابه انحنا در این نقطه ثبت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود برای مقدار انحنا محلی داده‌ها و به دنبال آن مقدار داده میدان پتانسیل در مرکز پنجره  $(x_0)$  سه حالت زیر اتفاق می‌افتد (فیلیس، ۱۹۹۲):

(۱) در صورتی که انحنا محاسبه شده برای نقطه انتخابی مفروض صفر باشد، داده میدان پتانسیل مربوط به مرکز پنجره بدون تغییر رها می‌شود و درحکم مقدار تراس‌بندی در این نقطه انتخاب می‌شود.

(۲) اگر مقدار انحنا محاسبه شده مثبت باشد، کمینه مقدار داده میدان پتانسیل درون پنجره جاگزین نقطه مرکزی می‌شود و آن را درحکم مقدار تراس‌بندی در نظر می‌گیرند.

(۳) اگر مقدار انحنا محاسبه شده منفی باشد، بیشینه مقدار داده میدان پتانسیل محاط در پنجره جایگزین نقطه مرکزی می‌شود و آن را درحکم مقدار تراس‌بندی در این نقطه انتخاب می‌کنند. تراس‌بندی را می‌توان به صورت یک روش تکراری استفاده کرد که این کار سبب می‌شود تا نتیجه به تدریج برجسته‌تر (تیزتر) شود.



شکل ۱. استفاده از روش تراس‌بندی در مورد نیم‌رخ فرضی تابع  $f$  مرکز پنجره  $w$  روی نقطه  $x_0$  قرار دارد. تراس‌بندی در  $(n+1)$  امین تکرار قرار دارد. براساس علامت انحنا محاسبه شده، مقدار داده در نقطه  $x_0$  افزایش یا کاهش می‌یابد و یا بدون تغییر انتخاب می‌شود.

## ۲ محاسبه تراس‌بندی برای حالت دو بُعدی

تراس‌بندی را می‌توان به راحتی برای حالت دو بُعدی تعمیم داد. برای این کار گرادیان داده‌ها با استفاده از عملگر مشتق لاپلاس دو بُعدی و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{2D} = \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right) \quad (۳)$$

مقدار انحنا نیز با استفاده از تقریب زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۲. تقریب سه نقطه ای مورد استفاده در محاسبه انحنای داده‌ها در حالت دو بُعدی.

-/۰.۶۲۵	-/۰.۶۲۵	-/۰.۶۲۵
-/۰.۶۲۵	۰/۵	-/۰.۶۲۵
-/۰.۶۲۵	-/۰.۶۲۵	-/۰.۶۲۵

استفاده از روش‌های تقریبی فوق در محاسبه انحنا این مشکل را به همراه دارد که در گوشه‌های بی‌هنجاری گردش‌گی کاذب ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر چون انحنای داده‌ها با استفاده از تقریبی که نسبت به امتدادهای متفاوت اریب است محاسبه می‌شود، گوشه‌های بی‌هنجاری با گردش‌گی همراه است و مرزهای برآوردی با موقعیت واقعی توده‌های مولد مطابقت نخواهد داشت. برای مثال نتایج تقریب فوق برای امتدادهای با زاویه ۴۵ درجه نسبت به یکدیگر اریب خواهد بود. برای حل این مشکل می‌توان از روش "انحنای نیم‌رخ (Profile curvature)" استفاده کرد. در این روش انحنای داده‌ها در هر نقطه فقط در امتدادی که داده‌ها بیشترین شدت را دارند محاسبه می‌شود. در این روش از رابطه زیر استفاده می‌شود (گنزالز و وود،؛ کوپر و کوان، ۲۰۰۸):

$$C_{PR} = \frac{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}{pd^5} \quad (۴)$$

که در آن،  $p = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2$  و  $q = p + 1$ ،  $f$  داده‌های میدان پتانسیل و  $C_{PR}$  انحنای داده‌های با استفاده از روش "انحنای نیم‌رخ" است.

## ۳ کاربرد بر روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی

برای کاربرد روش تراس‌بندی روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی، مدلی شامل ۵ توده منشوری با سطح مقطع‌های به ابعاد متفاوت و یک توده کروی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل مصنوعی در جدول ۳ آمده است. زاویه میل و انحراف بردار میدان مغناطیس زمین به ترتیب ۶۰ و ۱۵ درجه و شدت میدان مغناطیس اطراف ۴۵۰۰۰ نانوتسلا در نظر گرفته شده است. شکل ۲-الف نقشه پاسخ مغناطیسی مدل مصنوعی را نشان می‌دهد. در شکل ۲-ب تراس‌بندی داده‌های مغناطیسی قسمت الف در تکرار دوازدهم به روش تقریب لاپلاس آمده است. در این شکل گوشه‌های مدل با نوعی گردش‌گی همراه است که یکی از مشکلات این روش است. به علاوه اینکه به دلیل هم‌پوشانی بین توده‌ها، تفکیک کامل بین آنها صورت نگرفته است. شکل ۲-ج مربوط به تراس‌بندی داده‌های مغناطیسی قسمت الف در تکرار دوازدهم و با روش انحنای نیم‌رخ است. در این شکل بین توده‌های متفاوت تفکیک صورت گرفته و موقعیت توده منشوری  $E$  به خوبی برجسته شده است. باین حال گوشه‌های توده‌های دیگر همچنان حالت گردش‌گی دارد. از آنجاکه تراس‌بندی یک روش تکراری است، با افزایش تعداد دفعات تکرار الگوریتم می‌توان کارایی روش را بهبود داد. به همین منظور در شکل ۲-د تراس‌بندی داده‌های مغناطیسی قسمت الف در تکرار پانزدهم و با روش انحنای نیم‌رخ آمده است. در ضمن تفکیک کامل بین توده‌های متفاوت گوشه‌های آنها با دقت زیادی نسبت به اطراف برجسته شده است.

حدود توده‌ها به صورت متداخل مشخص شده است. شکل ۳-ج مربوط به نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار یازدهم و با روش جدید انحنای نیم‌رخ است که در آن حدود توده‌ها از هم تفکیک شده است اما همچنان گوشه‌های آنها گردش‌دگی دارد و به اصطلاح، اثر لبه در آنها دیده می‌شود. در شکل ۳-د نقشه تراس‌بندی داده‌های گرانی قسمت الف در تکرار شانزدهم را نشان می‌دهد که در آن دقت برجستگی توده نسبت به قسمت ج افزایش یافته است.

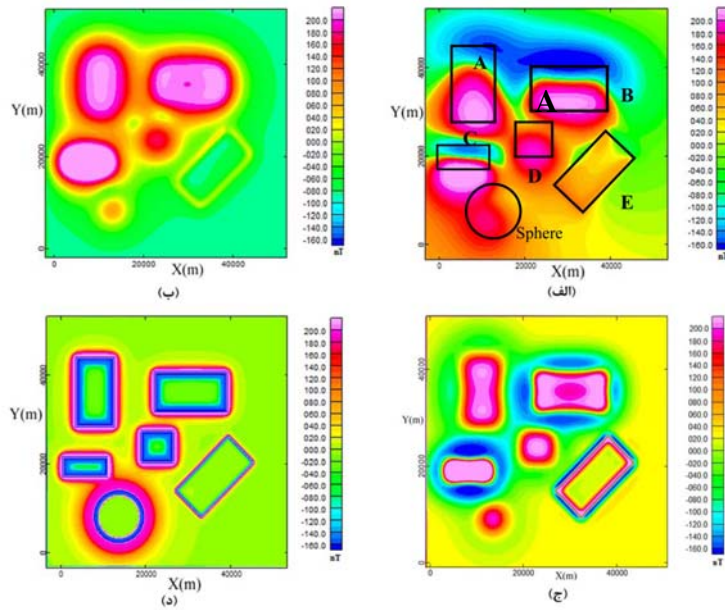
در مثال دوم کاربرد تراس‌بندی روی داده‌های گرانی مصنوعی مدلی متشکل از ۶ توده منشوری با سطح مقطع مستطیل و ابعاد متفاوت نشان داده می‌شود. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در تولید پاسخ گرانی مدل در جدول ۴ آمده است. شکل ۳-الف نقشه پاسخ گرانی مدل منشوری قائم را نشان می‌دهد. در شکل ۳-ب نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار یازدهم و با روش تقریب لاپلاس آمده است. همانند مثال قبل در این روش گوشه‌های مدل با گردش‌دگی مشخص می‌شود و

جدول ۳. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در توده‌های مولد مدل مصنوعی مثال اول.

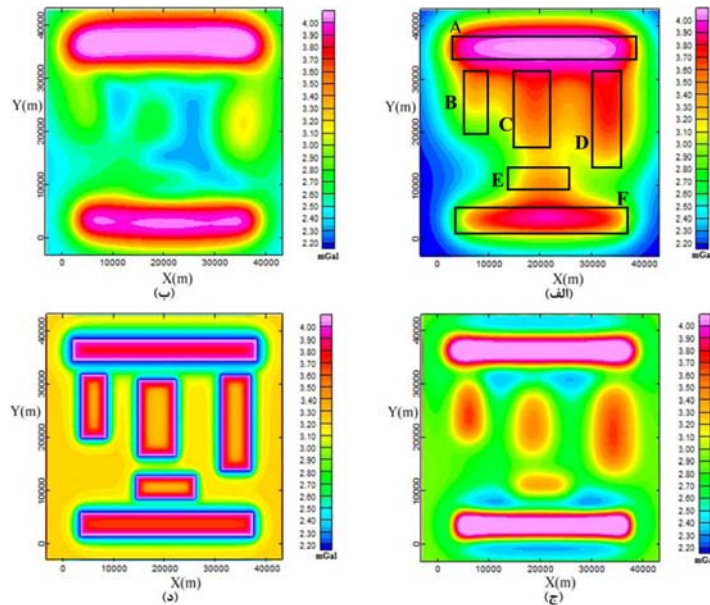
نوع توده	موقعیت طولی (X) (متر)	موقعیت عرضی (Y) (متر)	عمق (متر)	ضخامت (متر)	شعاع (متر)	شدت مغناطیس‌شدگی (A/m)
منشور A	۱۰۰۰۰	۳۸۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰	-	۵
منشور B	۳۰۰۰۰	۳۸۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰	-	۴/۵
منشور C	۵۰۰۰	۲۰۰۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰	-	۴/۷۵
منشور D	۲۲۵۰۰	۲۲۰۰۰	۵۰۰۰	۳۰۰	-	۵
منشور E	۳۷۵۰۰	۱۸۰۰۰	۶۰۰۰	۴۳۰	-	۴
کره	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۵۰۰۰	-	۱۵۰۰	۳

جدول ۴. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در توده‌های مولد مدل مصنوعی مثال دوم.

نوع توده	موقعیت طولی (X) (متر)	موقعیت عرضی (Y) (متر)	عمق (متر)	ضخامت (متر)	شدت مغناطیس‌شدگی (A/m)
منشور A	۲۰۰۰۰	۳۶۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۵/۵
منشور B	۶۰۰۰	۲۷۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۴/۵
منشور C	۲۰۰۰۰	۲۵۰۰۰	۴۰۰۰	۱۲۵	۳
منشور D	۳۵۰۰۰	۲۵۰۰۰	۶۰۰۰	۱۴۵	۳/۵
منشور E	۲۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۱۵۰	۳
منشور F	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰	۳۰۰۰	۲۰۰	۳/۵



شکل ۲. کاربرد تراس‌بندی روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی. پارامترهای فیزیکی توده‌ها در جدول ۳ آمده است. (الف) پاسخ مغناطیسی مدل مصنوعی به ازای زاویه میل و انحراف بردار مغناطیس‌شدگی برابر با ۶۰ و ۱۵ درجه، (ب) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار دوازدهم و با روش تقریب لاپلاس. گردش‌دگی گوشه‌های مدل به اضافه تداخل مرزها از مشکلات این روش است. (ج) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار دوازدهم و با روش جدید انحنا نیم‌رخ. در این شکل همچنان گردش‌دگی گوشه‌ها دیده می‌شود که برای بهبود نتایج به تعداد دفعات بیشتر نیاز است. (د) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار پانزدهم و با روش جدید انحنا نیم‌رخ.

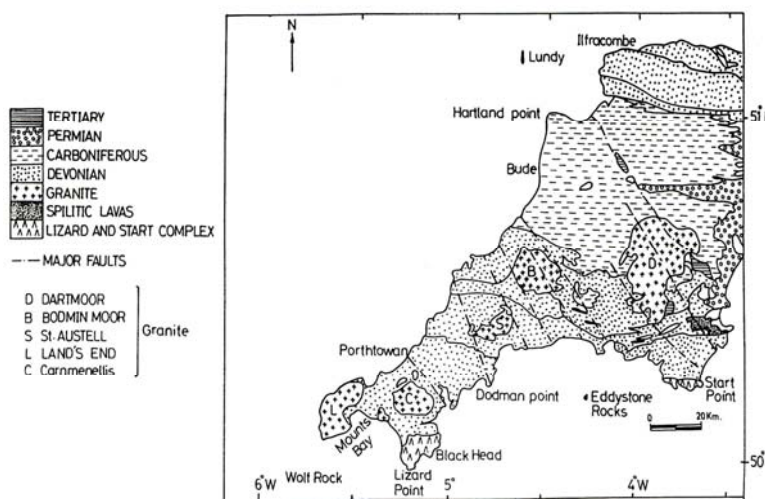


شکل ۳. کاربرد تراس‌بندی روی داده‌های گرانی مصنوعی. پارامترهای فیزیکی توده‌ها در جدول ۴ آمده است. (الف) پاسخ گرانی مدل مصنوعی متشکل از ۶ توده منشوری با سطح مقطع‌های با ابعاد متفاوت، (ب) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار دوازدهم و با روش تقریب لاپلاس. گردش‌دگی گوشه‌های مدل به اضافه تداخل مرزها از مشکلات این روش است. (ج) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار دوازدهم و با روش جدید انحنا نیم‌رخ. در این شکل همچنان گردش‌دگی گوشه‌ها دیده می‌شود که برای بهبود نتایج به تعداد دفعات بیشتر نیاز است. (د) نقشه تراس‌بندی داده‌های قسمت الف در تکرار پانزدهم و با روش جدید انحنا نیم‌رخ.

#### ۴ کاربرد روی داده‌های میدان پتانسیل واقعی

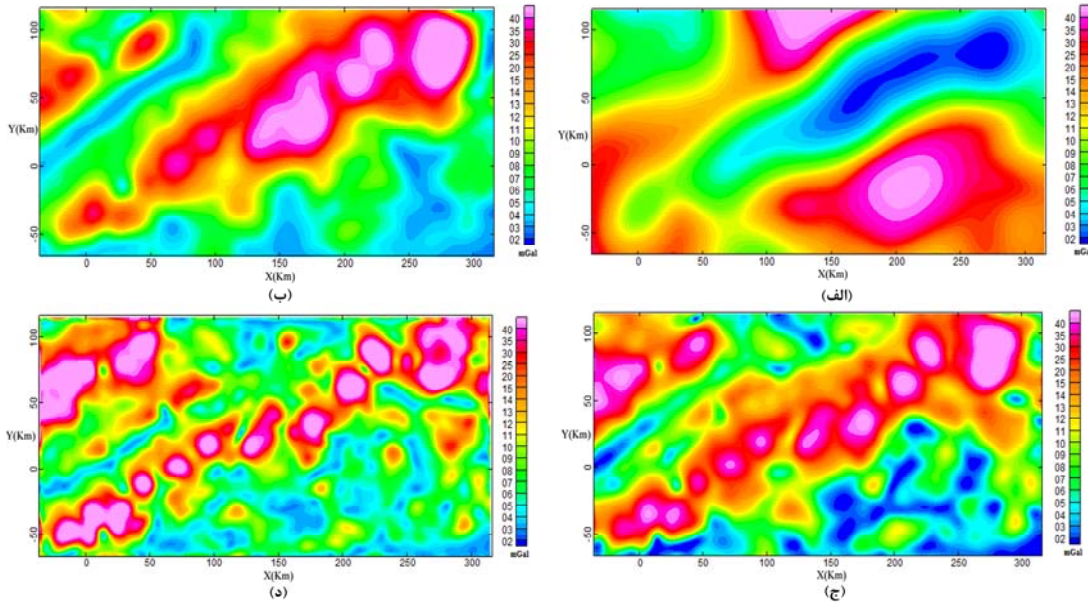
گوشه ضلع جنوب غربی انگلستان رشته کوه کورنوبین خوانده می‌شود که از سمت شمال و جنوب به ترتیب توسط دریا‌های کلتیک و کانال انگلیسی محصور شده است. در این رشته کوه پنج رخنمون اصلی گرانیت از منطقه دارتمور تا جزایر سیلی وجود دارد. همچنین تعدادی رخنمون کوچک و با شکل نامنظم دیگر نیز وجود دارد (شکل ۴). جزایر سیلی و سون استون متشکل از توده‌های گرانیتی هستند که در ادامه رشته کوه پیش گفته در دریا قرار گرفته‌اند. در همه موارد گرانیتهای در اسلیت‌های خاکستری دونین و کربنیفر نفوذ کرده‌اند. این باتولیت‌های گرانیتی باعث ایجاد یک بی‌هنجاری منفی بزرگ با روند شمال شرقی - جنوب غربی شده‌اند که ناشی از چگالی پایین گرانیتهای است. شکل ۵-الف نقشه هم‌مقدار گرانی جنوب غرب انگلستان را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری گرانی منفی منطبق بر توده‌های گرانیتی است (انصاری، ۲۰۰۲). شکل ۵-ب نقشه تراس‌بندی استاندارد (روش تقریب لاپلاس) داده‌های قسمت الف را در تکرار دوازدهم نشان می‌دهد. در شکل ۵-ج نقشه تراس‌بندی جدید (روش انحنا نیم‌رخ) داده‌های گرانی‌سنجی قسمت الف را در تکرار دوازدهم نشان می‌دهد. در این

شکل حدود توده‌های گرانیتی پنج‌گانه در حکم منابع مولد بی‌هنجاری گرانی با دقت زیادی از اطراف برجسته شده است. شکل ۵-د مربوط به نقشه تراس‌بندی جدید داده‌های گرانی در تکرار چهاردهم است. در نتیجه، افزایش دفعات تکرار تراس‌بندی، موجب افزایش دقت نتایج خروجی می‌شود. مقایسه بین شکل ۵-د و نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهد که با استفاده از روش تراس‌بندی، حدود توده‌های گرانیتی و گسل‌های جدا کننده آنها نسبت به اطراف برجسته شده است. در تصویر اصلی شکل ۵-الف به دلیل هم‌جواری توده‌های گرانیتی و تکنویزه بودن منطقه، حدود توده‌ها و مرز گسل‌های بین آنها مشخص نیست. این مشکل با وجود اینکه داده‌های گرانی‌سنجی مورد استفاده، از نوع با دقت هستند به چشم می‌خورد. در نتیجه ناگزیر باید از فیلترهای برآورد مرز استفاده شود. از طرفی اکثر فیلترها از مشتق قائم داده‌های پتانسیل استفاده می‌کنند که خروجی آنها به نوبه آلوده شده است. در روش تراس‌بندی فقط از انحنا داده‌ها (مشتق افقی در جهت‌های X و Y) استفاده می‌شود که برجستگی نوبه آن حداقل است. ضمن اینکه در خروجی این روش در شکل ۵-د حدود توده‌ها به همراه گسل‌های بین آنها نسبت به اطراف بارزسازی شده است.



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ساده شده جنوب غرب انگلستان.





شکل ۵. کاربرد تراس‌بندی روی داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان. (الف) نقشه هم‌مقدار گرانی منطقه، (ب) نقشه تراس‌بندی استاندارد در تکرار دوازدهم، (ج) نقشه تراس‌بندی جدید در تکرار دوازدهم و (د) نقشه تراس‌بندی جدید در تکرار چهاردهم. موقعیت توده‌های گرانی با حروف سرخ‌رنگ در شکل (الف) مشخص شده است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این نوشتار تراس‌بندی داده‌های میدان پتانسیل به منزله یکی از روش‌های تفسیری با استفاده از دو روش لاپلاس و انحنا نیم‌رخ بیان شد. کاربرد این روش روی داده‌های مغناطیسی و گرانی مدل‌های مصنوعی پیچیده و همچنین داده‌های گرانی‌سنجی جنوب غرب انگلستان بیانگر این مطلب است که استفاده از روش جدید انحنا نیم‌رخ نتایج دقیق‌تری به دست می‌دهد و زمانی که توده‌های مجاور هم‌پوشانی داشته باشند، عملیات تراس‌بندی، حدود توده‌ها را به صورت جدا از هم مشخص می‌کند. همچنین نشان داده شد که افزایش تعداد دفعات تکرار محاسبات تراس‌بندی سبب افزایش دقت خروجی خواهد شد. اکثر فیلترهای برآورد مرز از مشتق قائم داده‌های پتانسیل استفاده می‌کنند که این امر سبب آلوده شدن خروجی آنها به نوفه می‌شود. در روش تراس‌بندی فقط از انحنا داده‌ها

(مشتق افقی در جهات X و Y) استفاده می‌شود که برجستگی نوفه آن حداقل است.

#### منابع

- Atchuta Rao, D., Ram Babu, H. V., and Sanker Narayan, P. V., 1981, Interpretation of magnetic anomalies due to dikes, The complex gradient method, *Geophysics*, **46**, 1572-1578.
- Ansari, A. H., 2002, Geophysical investigations of the southwest British Isles, Unpublished, PhD thesis, University of Bristol, UK.
- Bastani, M., and Pedersen, L. B., 2001, Automatic interpretation of magnetic dikes parameters using the analytic signal technique, *Geophysics*, **66**, 551-561.
- Baranov, V. 1957, A new method for the interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies, *Geophysics*, **22**, 359-383.
- Blakely, R. J., and Simpson, R. W., 1986, Locating edges of source bodies for magnetic or gravity anomalies, *Geophysics*, **51**, 1494-1498.

- implementations, Department of the interior, US geological survey open file report, 92-5.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal, *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002, Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations, *Journal of Applied Geophysics*, **49**, 231-244.
- Williams, S. E., Fairhead, J. D., and Flanagan, G., 2002, Realistic models of basement topography for depth to magnetic basement testing, 72th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 814-817.
- Williams, S. E., 2005, Comparison of grid Euler deconvolution with and without 2D constraints using a realistic 3D magnetic basement model, *Geophysics*, **70**, L13-L21.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2004, Filtering using variable order vertical derivatives, *Computers & Geosciences*, **30**(5), 1585-1591.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2008, Edge enhancement of potential field data using normalized statistics, *Geophysics*, **73**(3), H1-H4.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2009, Terracing in potential field data, *Geophysical prospecting*, **57**(3), 1067-1071.
- Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R., 2010, Enhancing ridges in potential field data, *Exploration Geophysics*, **41**(2), 170-173.
- Cordell, L., and McCafferty, A. E., 1989, A terracing operator for physical property mapping with potential field data, *Geophysics*, **54**, 621-634.
- Gonzalez, R. C., and Woods, R. E., 2002, *Digital Image Processing*, 2<sup>nd</sup> edn, Prentice-Hall.
- Mitasova, H., and Jaroslav, H., 2005, Interpolation by regularized spline with tension, II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis, *Mathematical Geology*, **25**, 657-669.
- 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.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *Geophysics*, **39**, 85-92.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential-field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations, *Geophysics*, **49**, 780-786.
- Nabighian, M. N., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., Peirce, J. W., Phillips, J. D., and Ruder, M. E., 2005, The historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysics*, **70**(6), 33ND- 61ND.
- Nelson, J. B., 1988, Comparison of gradient analysis techniques for two-dimensional magnetic sources, *Geophysics*, **53**, 1088-1095.
- Pedersen, L. B., 1989, Relations between horizontal and vertical gradients of potential fields, *Geophysics*, **54**, 662-663.
- Philips, J. D., 1992, TERRACE: A terracing procedure for gridded data, with FORTRAN programs, and VAX Command Procedure, Unix C-Shell, and DOS batch file