مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۲، ۱۳۹۱، صفحهٔ ۱۰۷- ۱۲۱

یادداشت تحقیقاتی

تفسیر بی‌هنجاری‌های گرانی توده‌های کم‌عمق با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال‌شده

میثم عابدی[1*]، احمد افشار[2]، وحید ابراهیم‌زاده اردستانی[3] و غلامحسین نوروزی[4]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن- اکتشاف، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
[2] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن- اکتشاف، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران
[3] دانشیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
[4] دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۲/۲۶ ، پذیرش نهایی: ۹۰/۱۱/۱۱)

چکیده

روش گرادیان کامل نرمال شده (NFG) به‌صورت گسترده در روش‌های پتانسیل، به‌خصوص گرانی و مغناطیس به کار برده می‌شود. از آنجا که در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو محاسبات در بُعد بسامد صورت می‌گیرد، اثر نوفه به شدت باعث تخریب این نقشه‌ها می‌شود؛ بنابراین با استفاده از روش NFG این روش تفسیر داده‌های گرانی صورت می‌پذیرد. با استفاده از این روش می‌توان محل، عمق مرکز و بالای توده‌ها را برآورد کرد. یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین شکل دقیق توده، به‌خصوص در برآورد عمق توده، به‌کارگیری درست عدد هماهنگ (هارمونیک) در رابطه NFG است. در این مقاله محدوده مناسب این عدد هماهنگ مشخص می‌شود و سپس این روش روی داده‌های مصنوعی نوفه‌دار و بدون نوفه آزمایش می‌شود. در انتها این روش به صورت دو و سه‌بُعدی روی داده‌های واقعی، یعنی توده زغال بیتومینه دهلران به کار می‌رود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های مصنوعی، داده‌های گرانی، NFG دوبُعدی، NFG سه‌بُعدی، زغال بیتومینه

Interpretation of near-surface gravity anomalies by the normalized full gradient method

Abedi, M.[1], Afshar, A.[2], Ardestani, V. E.[3] and Norouzi, GH. [4]

[1] M.Sc student of Exploration Engineering, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran
[2] M.Sc student of Exploration Engineering, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran
[3] Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
[4] Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

(Received: 16 May 2009, Accepted: 31 Jan 2012)

Abstract

The normalized full gradient (NFG) method defined by Berezkin (1967, 1973 and 1998) is used for downward continuation maps. Analytical downward continuation is a method to estimate the field closer to the source and consequently results in a better resolution of underground rock distribution. However, the usefulness of this process is limited by the fact that the operation is extremely sensitive to noise. With noise free data, downward continuation is well defined; we do not attempt to continue below the source level. In the presence of noise, the amplification of high frequencies is so strong that it quickly masks the information in the original profile. Low-pass Fourier filtering, while suppressing such noise, also blurs the signal, overcoming the purpose of sharpening by downward continuation.

*نگارنده رابط: تلفن: ۰۹۱۷۳۱۲۴۱۳۲ دورنگار: ۹۵۶۰-۸۸۰۰-۰۲۱ E-mail: maysamabedi@ut.ac.ir

Despite the above-mentioned problems, most geophysical experts have long been interested in this technique because of its importance to the mineral exploration. Furthermore, this method is a fast and cheap way to determine the initial depth of the subsurface features, especially where there is no other geophysical or well-logging data. A good analytical downward continuation process could provide subsurface general images, allowing an enhanced interpretation. Also, analytical downward continuation has the ability to determine accurately both horizontal and vertical extents of geological sources.

This method is concisely described in the following section. The 2-D NFG of gravity anomalies is defined as (Berezkin, 1973):

$$G_H(x,z) = \frac{G(x,z)}{G_{cp}(z)} = \frac{\sqrt{V_{xz}{}^2(x,z) + V_{zz}{}^2(x,z)}}{\frac{1}{M}\sum_0^M \sqrt{V_{xz}{}^2(x,z) + V_{zz}{}^2(x,z)}} \tag{1}$$

Where $G_H(x, z)$ is the NFG at point (x, z) on a cross-section x-z; $V_{zz}(x, z)$ and $V_{xz}(x, z)$ are the first vertical derivative and the first horizontal (along the x-direction) derivative of gravity anomalies Δg (or V_z) at point (x, z), respectively; G(x, z) is the full (total) gradient of gravity anomalies at point (x, z); $G_{CP}(z)$ is the average of the full gradient of gravity anomalies at level z; and *M* is the number of samples in a data set.

Berezkin (1973) expressed the gravity anomalies $\Delta g(x,z)$ over the range (-L, L) by the finite Fourier sine series,

$$\Delta g(x,z) = \sum_{n=1}^{N} B_n \sin\frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \tag{2}$$

where

$$B_n = \frac{2}{L}\int_0^L \Delta g(x,0)\sin\frac{\pi n x}{L}\,dx \tag{3}$$

L is the integral interval or length of the gravity profile; and *N* is the number of harmonics of the series. From Eq. (2) it follows that

$$V_{xz}(x,z) = \frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n \cos\frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \tag{4}$$

$$V_{zz}(x,z) = \frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n \sin\frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \tag{5}$$

Defining a smoothing factor for eliminating high-frequency noise resulting from downward continuation, we have,

$$q_m = \left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{6}$$

Where, m is known as the degree of smoothing. It was suggested to choose *m =1* or *2* to reach reasonable results. Finally,

$$\Delta g(x,z)=\sum_{n=1}^{N} B_n \ \sin\frac{\pi n x}{L}\, e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{7}$$

$$V_{xz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_{1}^{N} nB_n \cos\frac{\pi n x}{L}\, e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{8}$$

$$V_{zz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_{1}^{N} nB_n \sin\frac{\pi n x}{L}\, e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{9}$$

Substituting Eqs. 8 and 9 into Eq. 1, the NFG is calculated.

The NFG method nullifies perturbations due to the passage of mass depth during downward continuation. The method depends on the downwards analytical continuation of normalized full gradient values of gravity data. Analytical continuation discriminates certain structural anomalies which cannot be distinguished in the observed gravity field. It can be used to estimate location, depth to the top and center of the deposit that is applied also for detecting oil reserviors and tectonic studies. One of the important parameter to estimate accurate shape of the deposit is true selection of the harmonic number. In this paper, the correct range of the harmonic number is determined and then this method will be tested for noise-free and noise-corruption synthetic data. Finally, 2D and 3D of this method are applied on real data, Dehloran Bitumen.

Key words: Synthetic models, Gravity data, 2D-NFG, 3D-NFG, Dehloran Bitumen

۱ مقدمه

در مدل‌سازی داده‌های گرانی، از مهم‌ترین پارامترهایی که در کارهای اکتشافی مورد توجه است، تعیین محل و عمق توده هدف است. امروزه روش‌های گوناگون مانند روش اویلر (Euler)، حداقل مربعات (least-squares)، روش واهامیخت ورنر (Werner) و شبکه‌های عصبی (Neural Network) برای چنین مدل‌سازی‌هایی وجود دارد (سالم و همکاران، ۲۰۰۴).

در به‌کارگیری روش اویلر تعیین ضریب ساختار و طول پنجره برآوردگر از پارامترهای مجهول هستند و به شدت جواب‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (سلاجقه و اردستانی، ۱۳۸۵). همچنین در روش شبکه عصبی، انتخاب محدوده عمق و ابعاد بلوک‌سازی در مقاطع دو و سه‌بُعدی مجهول‌اند و جواب‌ها با افزایش عمق توده تحت تأثیر قرار می‌گیرند (عثمان و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷). روش ورنر نیز دارای محدودیت‌هایی است.

یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین محل توده‌ها از روی داده‌های گرانی، روش گرادیان کامل نرمال شده (Normalized Full Gradient) است که برزکین (۱۹۶۷، ۱۹۷۳ و ۱۹۹۸) آن را عرضه کرد. روش NFG برای مدل‌سازی مخازن نفتی نیز به کار رفته است (ژیائو، ۱۹۸۱؛ ژیائو و زانگ، ۱۹۸۴؛ زنگ و همکاران،۲۰۰۲). این روش همچنین برای اکتشاف‌های پتانسیل خودزا (SP) نیز به کار گرفته شده است (سیندرجی و همکاران، ۲۰۰۸).

در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو، محاسبات در بُعد بسامد و عدد موج صورت می گیرد و ازآنجاکه معمولاً در داده‌های برداشت شده نوفه وجود دارد؛ اثر این نوفه در

تحلیل فوریه داده‌ها به صورت بسامدهایی با دامنه زیاد است که باعث مخدوش شدن محاسبات می‌شود. درصورتی‌که از فیلتر پایین‌گذر (Low-pass) نیز استفاده شود، می‌توان این اثر مخرب را از بین برد ولی با این کار مقداری از اطلاعات همراه سیگنال موردنظر نیز از بین می‌رود که این یکی از مشکلات اساسی در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو است. بنابراین می‌توان از روش گرادیان کامل نرمال برای تهیه این نقشه‌ها استفاده کرد. با استفاده از این روش می‌توان محدوده تقریبی، عمق بالا و مرکز توده را برآورد کرد (آقاجانی و همکاران، ۲۰۰۹).

در این مقاله محدوده مناسب عدد هماهنگ به کار برده شده در رابطه NFG مشخص می‌شود و سپس این روش روی مدل‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در انتها بعد از کسب نتایج رضایت‌بخش برای مدل‌های مصنوعی، این روش برای تفسیر داده‌های گرانی منطقه دهلران به منظور تشخیص توده‌های زغال بیتومینه به کار می‌رود.

۲ مدل به‌کار گرفته شده

مدلی که اینجا به کار رفته است، یکی از معروف‌ترین مدل‌هایی است که پلوف (۱۹۷۵) برای مدل‌سازی سه‌بُعدی بی‌هنجاری‌های گرانی بیان کرده است (بلکلی، ۱۹۹۵). در این مدل، مجموعه‌ای از بلوک‌های مکعبی برای تقریب‌زنی شکل توده به کار می‌رود شکل ۱. هریک از بلوک‌ها ممکن است تفاوت چگالی دلخواهی با محیط اطراف داشته باشند؛ بنابراین طبق اصل جمع‌پذیری اثر داده‌های پتانسیل (گرانی و مغناطیس)، بی‌هنجاری گرانی در هر نقطه را می‌توان به صورت تقریبی از مجموع اثر هر کدام از بلوک‌ها دانست.

یک منشور چهاروجهی با چگالی یکنواخت ρ و با ابعاد مشخص در محدوده $x_1 \le x \le x_2$، $y_1 \le y \le y_2$ و $z_1 \le z \le z_2$ در مرکز مختصات، دارای جاذبه قائم به صورت زیر است (بلکلی، ۱۹۹۵):

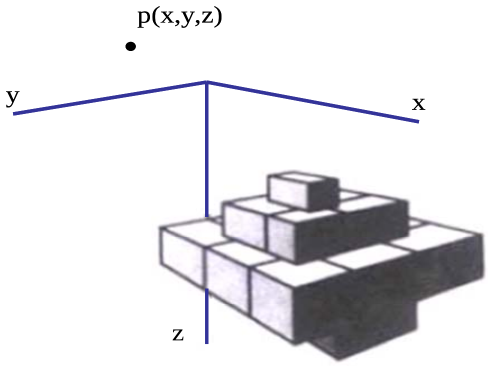
$$\gamma\rho \int_{z_1}^{z_2}\int_{y_1}^{y_2}\int_{x_1}^{x_2} \frac{z'}{\left[x'^2 + y'^2 + z'^2\right]^{\frac{3}{2}}} dx'\, dy'\, dz' \qquad (۱)$$

پلوف با محاسبه عددی انتگرال بالا، فرمول زیر را عرضه کرد:

$$g = \gamma\rho \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2} \mu_{ijk} \left[\begin{array}{l} z_k \arctan \dfrac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - \\ x_i.\log(R_{ijk} + y_j) - \\ y_j.\log(R_{ijk} + x_i) \end{array} \right] \qquad (۲)$$

که

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$$
$$\mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k}$$



شکل ۱. تقریب یک توده با استفاده از مجموعه‌ای از بلوک‌ها در سه بُعد (بلکلی، ۱۹۹۵).

روش NFG

گرادیان کامل نرمال شده برای مدل‌سازی دوبُعدی بی‌هنجاری‌های گرانی را برزکین (۱۹۷۳) این‌چنین تعریف کرد:

$$G_H(x,z)=\frac{G(x,z)}{G_{cp}(z)}=\frac{\sqrt{V_{xz}{}^2(x,z)+V_{zz}{}^2(x,z)}}{\frac{1}{M}\sum_0^M\sqrt{V_{xz}{}^2(x,z)+V_{zz}{}^2(x,z)}} \tag{۳}$$

کـــه در آن G_H، NFG در نقطـــه (x,y)، $V_{ZZ}(x,z)$ و $V_{XZ}(x,z)$، مـــشتق اول قـــائم و افقـــی داده‌هـــای گرانـــی هـــستند. $G(x,z)$، گرادیـــان کامـــل داده‌هـــای گرانـــی، $G_{cp}\ (z)$ میـــانگین گرادیـــان کامـــل در عمـــق z و M تعـــداد نقـــاط اســـت. بـــرزکین (۱۹۷۳)، بـــی‌هنجـــاری گرانـــی را بـــه صـــورت ســـری فوریـــه سینوسی در دامنه (L,L-) چنین بیان کرد:

$$\Delta g(x,z)=\sum_{n=1}^{N}B_n\ \sin\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}} \tag{۴}$$

که در آن:

$$B_n=\frac{2}{L}\int_0^L\ \Delta g(x,0)\sin\frac{\pi nx}{L}dx \tag{۵}$$

L طول نیم‌رخ گرانی و N تعداد جمله‌ها است. با توجه به معادله (۴) داریم:

$$V_{xz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n\cos\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}} \tag{۶}$$

$$V_{zz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n\sin\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}} \tag{۷}$$

برای حذف اثر نوفه‌های با بسامد زیاد ناشی از گسترش به سمت پایین و همچنین حذف اثر گیبس، از فاکتور هموارسازی استفاده می‌شود:

$$q_m=\left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{۸}$$

که برای اکتشافات نفتی، ۲ = m است و معمولاً ۱ یا ۲ در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر با آزمایش مدل‌های مصنوعی به دست آمده است. سرانجام داریم:

$$\Delta g(x,z)=\sum_{n=1}^{N}B_n\ \sin\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}}\left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{۹}$$

$$V_{xz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n\cos\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}}\left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m \tag{۱۰}$$

$$V_{zz}(x,z)=\frac{\pi}{L}\sum_1^N nB_n\sin\frac{\pi nx}{L}e^{\frac{\pi nz}{L}}\left(\frac{\sin\frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}\right)^m . \tag{۱۱}$$

با قرار دادن معادلات (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۳)، NFG به دست می‌آید. با این روش مرز و مرکز جسم را می‌توان برآورد کرد.

چون ساختارهای زمین‌شناسی اغلب سه‌بُعدی هستند؛ بنابراین مدل‌سازی سه‌بُعدی گرادیان کامل نرمال شده اِعمال می‌شود. رابطه NFG سه‌بُعدی به صورت زیر است:

$$G_H(x,y,z)=\frac{G(x,y,z)}{G_{cp}(z)}=\frac{\sqrt{V_{xz}^2(x,y,z)+V_{yz}^2(x,y,z)+V_{zz}^2(x,y,z)}}{\frac{1}{M}\sum_0^M\sqrt{V_{xz}^2(x,y,z)+V_{yz}^2(x,y,z)+V_{zz}^2(x,y,z)}} \tag{۱۲}$$

که در آن $V_{xz}(x,y,z)$، $V_{yz}(x,y,z)$ و $V_{zz}(x,y,z)$ مشتق اول بی‌هنجاری گرانی Δg (یا V_z) در جهت‌های x، y و z هستند. $G(x,y,z)$ گرادیان کامل در نقطه (x,y,z)، G_{cp} میانگین گرادیان کامل در عمق z و M تعداد کل نقاط است. رابطه (۱۲) را می‌توان برای محاسبه گرادیان کامل نرمال در هر سطحی از عمق z به کار برد؛ بنابراین می‌توانیم توزیع توده را در عمق‌های متفاوت به‌دست آوریم. ازآنجاکه محاسبات در حالت سه‌بُعدی پیچیده می‌شود با فرض نیم‌رخ‌هایی موازی روی نقشه بی‌هنجاری، روش گرادیان کامل نرمال دوبُعدی را برای هر نیم‌رخ پیاده می‌کنند و سپس به ازای یک عمق مشخص از همهٔ نیم‌رخ‌ها، خروجی حاصل از این روش در عمق

مشخص شده را به‌منزلهٔ نتایج مدل‌سازی سه‌بُعدی به کار می‌برند.

با استفاده از روش NFG دوبُعدی روی یک مقطع، می‌توان مرز توده هدف با زمینه و محدوده تقریبی عمق توده را به دست آورد و همچنین با به‌کارگیری NFG سه‌بُعدی نیز می‌توان توزیع توده را در عمق‌های متفاوت مشاهده کرد. بنابراین می‌توان یک نمایش سه‌بُعدی از وضعیت توده به‌دست آورد.

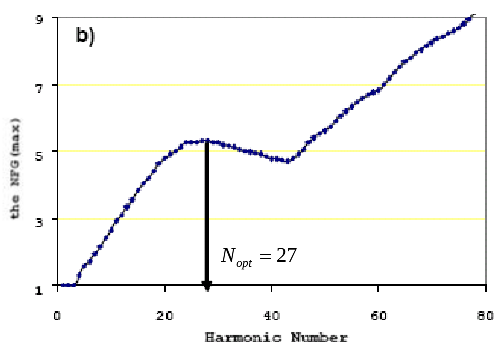
یکی از مهم‌ترین پارامترها در به‌کارگیری روش NFG، انتخاب بهینه عدد هماهنگ N است که تأثیر به‌سزایی در برآورد عمق دارد. در اکثر مقالات عرضه شده در این زمینه، تعیین این پارامتر با سعی‌وخطا صورت گرفته است. آقاجانی و همکاران (۲۰۰۹) پیشنهاد دادند، در صورتی که نمودار اعداد هماهنگ متفاوت با مقدار بیشینه NFG رسم شود می‌توان عدد هماهنگ بهینه را مشخص کرد (شکل۲). در این شکل پارامتر بهینه ۲۷ = N است. آقاجانی و همکاران این نمودار را برای مدل مصنوعی استوانه‌ای قائم با عمق ۱ کیلومتر و اختلاف چگالی ۱۰۰ kg/m^3 رسمو سپس با انتخاب عدد هماهنگ بهینه ۲۷، نقشه گرادیان کامل نرمال دوبُعدی را برای مقطع موردنظر ترسیم کردند که جواب آن نسبت به سایر اعداد هماهنگ مناسب‌تر بود. در مدل‌سازی داده‌های واقعی به این نکته می‌رسیم که پارامتر بهینه با این روش همواره جواب مناسب را می‌دهد. در این مقاله با استفاده از این روش، محدوده پارامتر بهینه مشخص می‌شود و سپس با سعی‌وخطا N مناسب را فقط در این محدوده پیدا می‌کنیم.

۳ مدل‌سازی داده‌های مصنوعی

برای بررسی میزان کارایی روش NFG، دو مدل را بررسی می‌کنیم. مدل اول یک بلوک با ابعاد ۵ متر و در عمق ۱ متر است. اختلاف چگالی مدل با زمینه ۱۰۰۰ kg/m^3 فرض شده است. بی‌هنجاری حاصل از این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اِعمال روش NFG، نیم‌رخ AA' روی این بی‌هنجاری انتخاب شد که در شکل ۴ منحنی آن نشان داده شده است.

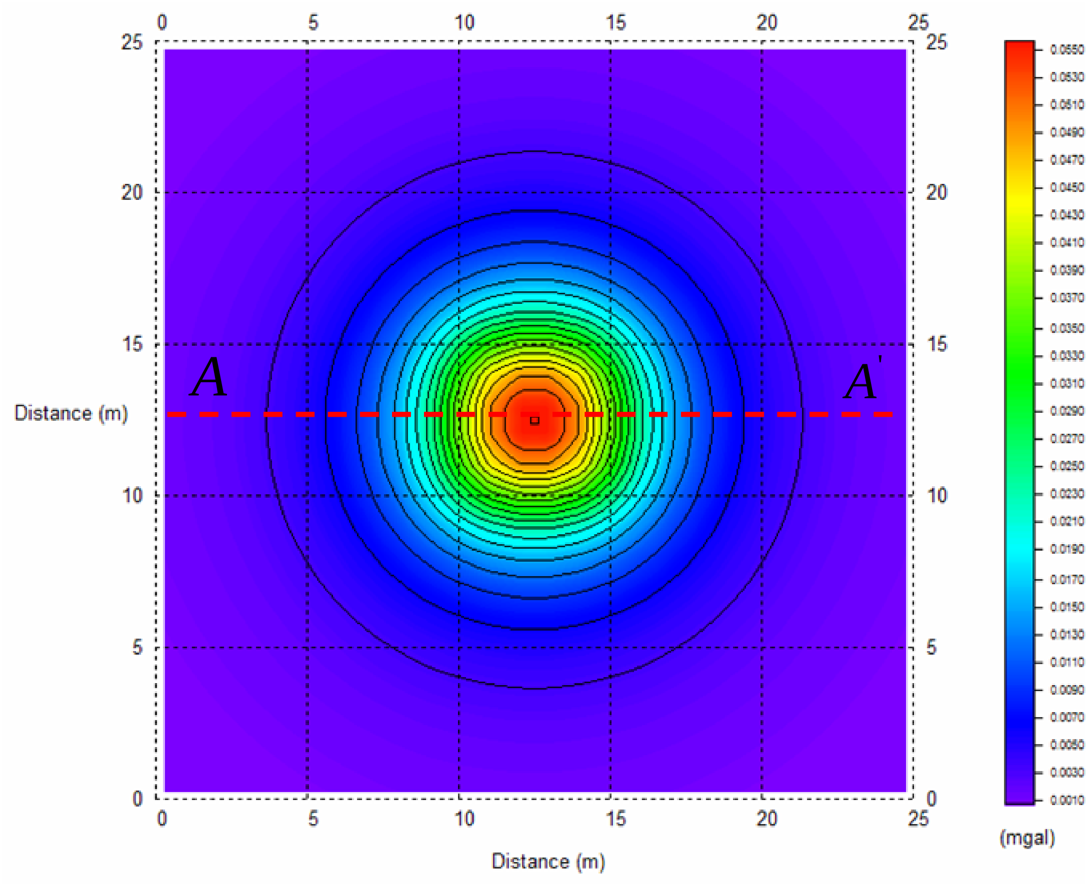
در ادامه با تغییر عدد هماهنگ در رابطه NFG و به دست آوردن مقدار بیشینه NFG، منحنی آن به دست می‌آید (شکل ۵). براساس این منحنی، محدوده مناسب برای انتخاب پارامتر N، بین ۵-۱۱ است. عدد ۱۱ اولین مقدار بیشینه و عدد ۵ کمترین میزان عدد هماهنگ قابل‌قبول است. بنابراین نقشه NFG بعد از آزمایش پارامتر N در این محدوده (۱۱-۵)، حاکی از بهینه بودن این پارامتر در عدد ۱۱ است. در شکل ۶ نقشه NFG برای سه عدد هماهنگ ۵، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

چون در داده‌های گرانی معمولاً نوفه وجود دارد، در مدل دوم همه داده‌ها را به صورت تصادفی بین ۰- ۵ درصد نوفه‌دار می‌کنیم. در این مدل طول بلوک ۴۰ متر، عرض ۲۰ متر و ضخامت نیز ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. عمق بلوک ۵ متر و اختلاف چگالی مدل با زمینه ۱۰۰۰ kg/m^3 است. بی‌هنجاری حاصل از این مدل در شکل ۷ نشان داده شده است. برای پیاده‌سازی روش NFG، نیم‌رخ BB' روی این بی‌هنجاری انتخاب شد که در شکل ۸ منحنی آن نشان داده شده است.

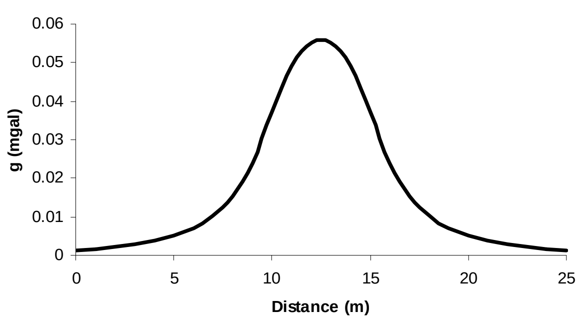


شکل۲. نمودار رابطه بین N و NFG(max) (آقاجانی و همکاران، ۲۰۰۹).

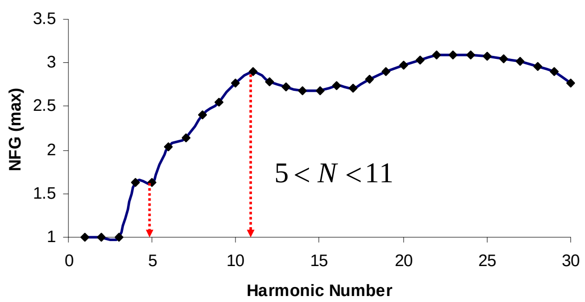
در این مدل نیز با تغییر عدد هماهنگ در رابطه NFG و به دست آوردن مقدار بیشینه NFG، منحنی تغییرات NFG براساس عدد هماهنگ به دست آمد (شکل ۹). براساس این منحنی محدوده مناسب برای انتخاب پارامتر N، بین ۵–۱۱ است. نقشه NFG بعد از آزمایش پارامتر N در این محدوده (۵–۱۱)، حاکی از بهینه بودن این پارامتر در عدد ۱۱ است. در شکل ۱۰ نقشه NFG برای سه عدد هماهنگ ۵، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



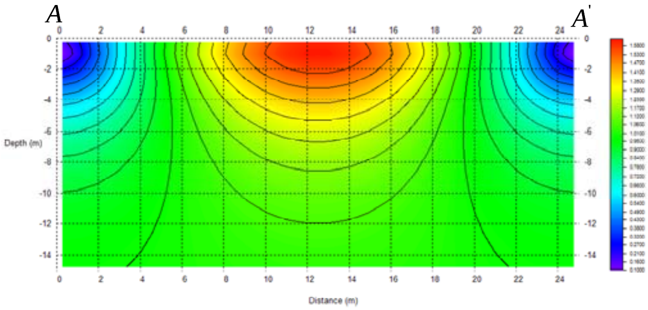
شکل ۳. بی‌هنجاری بازماند حاصل از مدل اول.



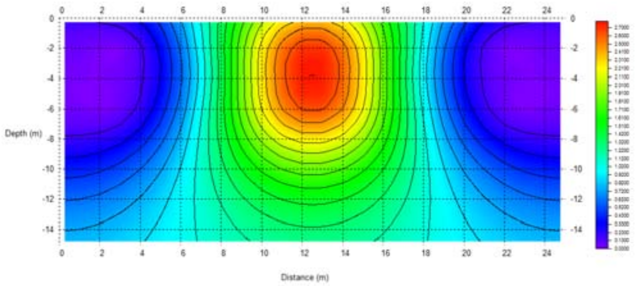
شکل ٤. منحنی بی‌هنجاری بازماند مدل اول در طول نیمرخ AA'.



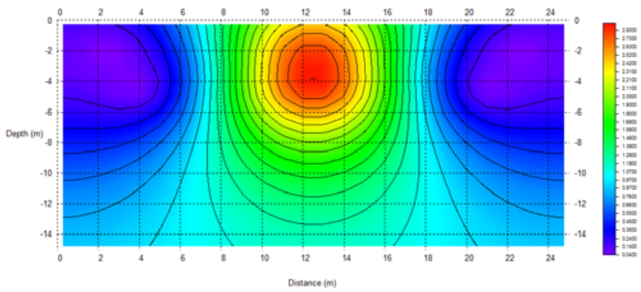
شکل ۵. نمودار رابطه بین N و NFG(max) برای مدل اول.



(الف)

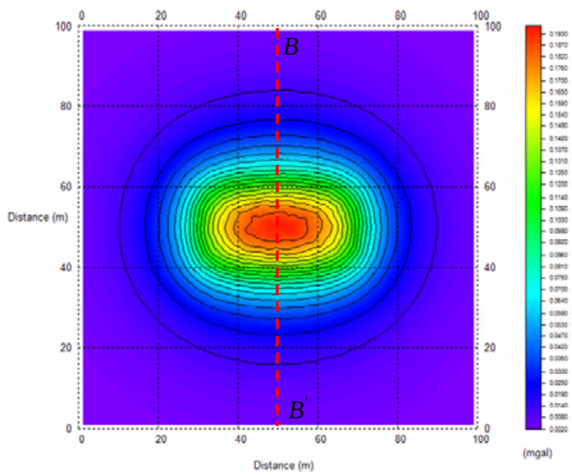


(ب)

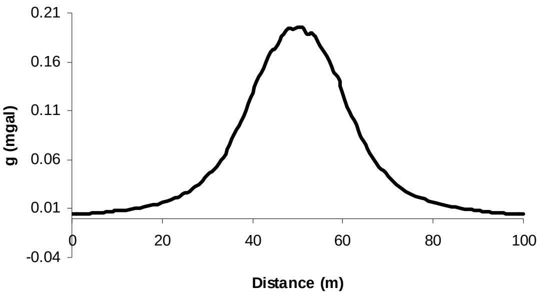


(ج)

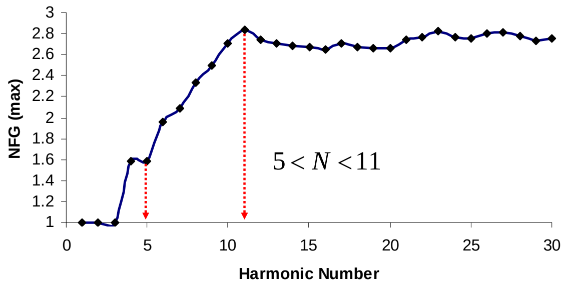
شکل٦. نقشه NFG حاصل از مدل اول، (الف) ۵ = N، (ب) ۱۰ = N و (ج) ۱۱ = N.



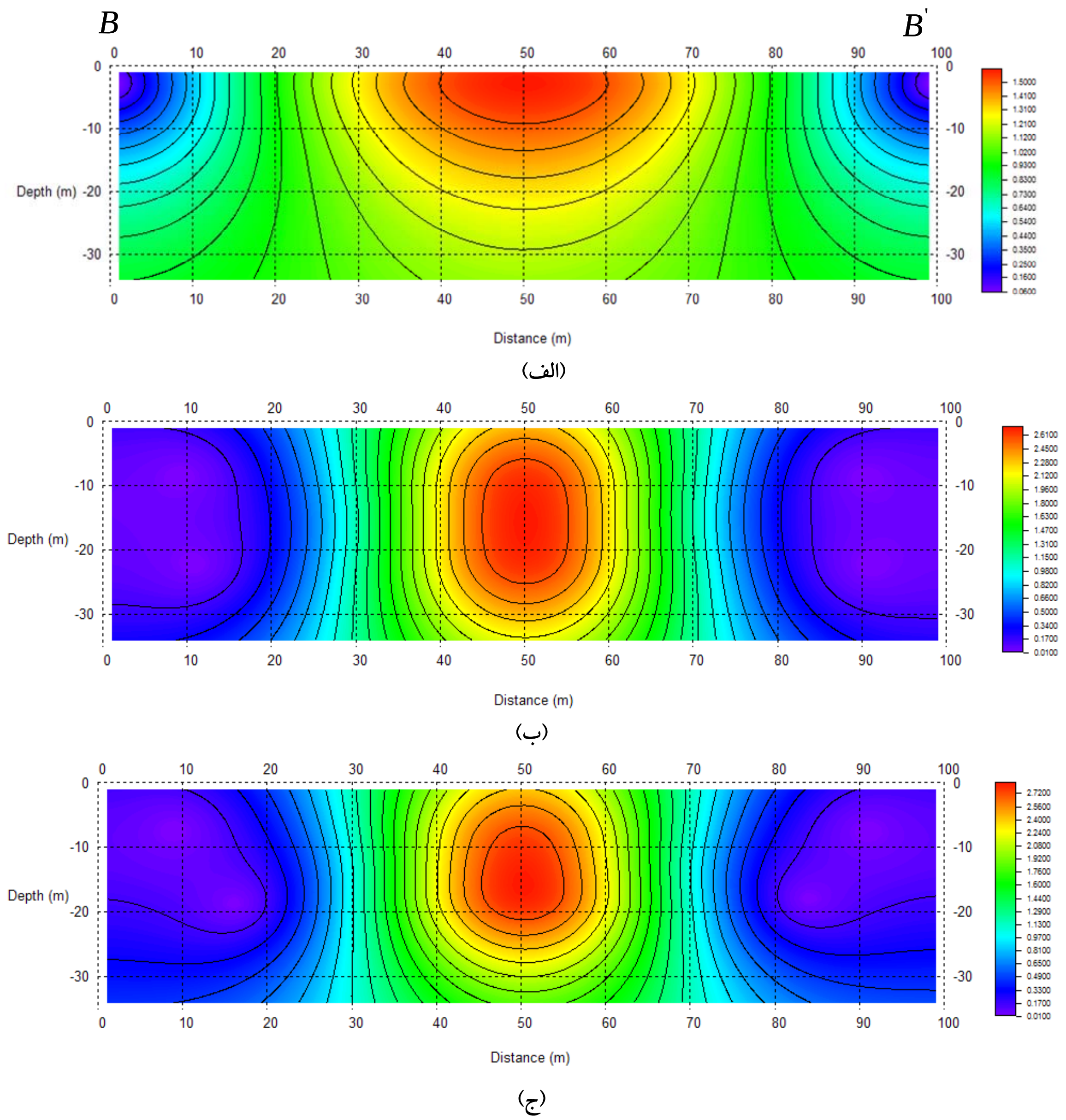
شکل۷. بی‌هنجاری حاصل از مدل دوم.



شکل۸. منحنی بی‌هنجاری بازماند مدل دوم در طول نیم‌رخ BB' .



شکل۹. نمودار رابطه بین N و NFG(max) برای مدل دوم.



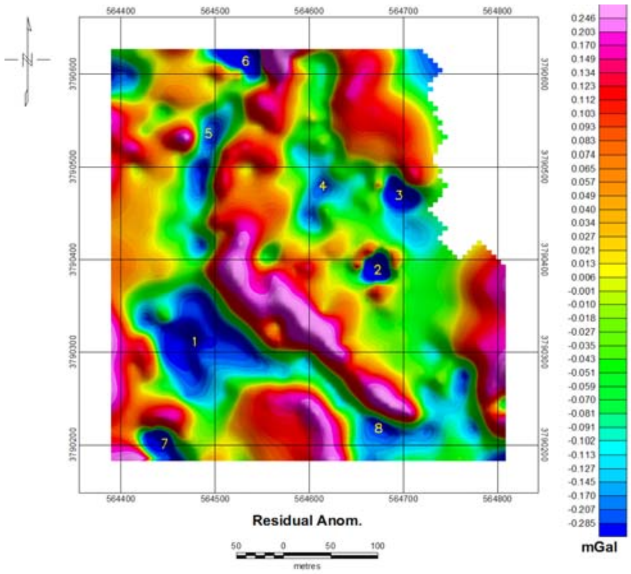
شکل۱۰. نقشه NFG حاصل از مدل نوفه‌دار دوم، (الف) N = ۵، (ب) N = ۱۰ و (ج) N = ۱۱.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ (ب و ج) می‌بینیم خروجی‌ها شبیه به هم هستند ولی در شکل ۱۰–ج، شکل توده فشرده‌تر است. در این مدل با وجود داشتن نوفه، محدوده عمق نسبتاً خوب تعیین شده است. همان‌طورکه می‌بینیم عمق بالای بلوک بهخوبی ۵ متر را نشان می‌دهد ولی عمق نهایی با این روش حدود ۲۲/۵ متر به‌دست می‌آید درحالی‌که عمق واقعی ما ۱۵ متر است. به‌طورکلی با حذف اثر نوفه سطحی، با استفاده از این روش می‌توان به نتایج مناسبی دست یافت.

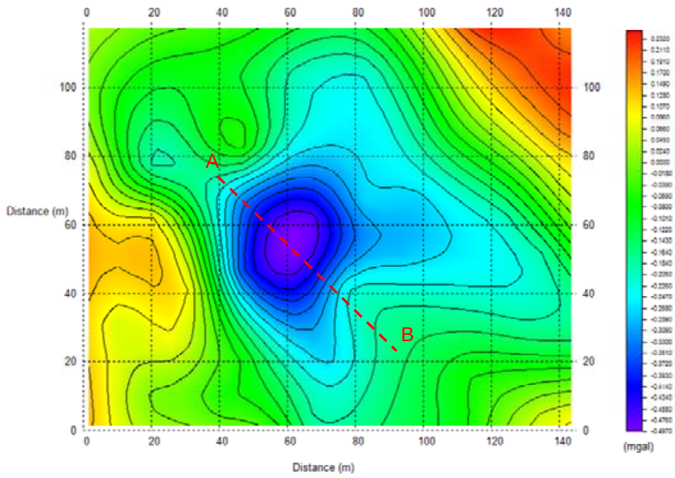
۴ مدل‌سازی داده‌های واقعی

ناحیه مورد تحقیق صحرایی در منطقه دهلران واقع در غرب ایران و در زون زمین‌ساختی زاگرس است. در منطقه دهلران، هدف ما اکتشاف بیتومین‌های نفتی است (شکل ۱۱). از نظر زمین‌شناسی سنگ‌های منطقه آهکی–مارنی است. برای برداشت نقاط از دستگاه گرانی‌سنجی نوع Scintrex CG3 با دقت ۵ میکروگال استفاده شده است. شبکه ۲۰ در ۲۰ متر برای برداشت این ناحیه انتخاب شده است. بعد از تصحیح داده‌های برداشت شده و حذف اثر روند ناحیه‌ای، بی‌هنجاری موردنظر ترسیم شد (شکل ۱۲). در اینجا فقط بی‌هنجاری شماره ۱ در نقشه را بررسی می‌کنیم (شکل ۱۳). در این بی‌هنجاری، نیم‌رخ شمال غربی– جنوب شرقی AB برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده که نمودار آن در شکل ۱۴ آورده شده است.

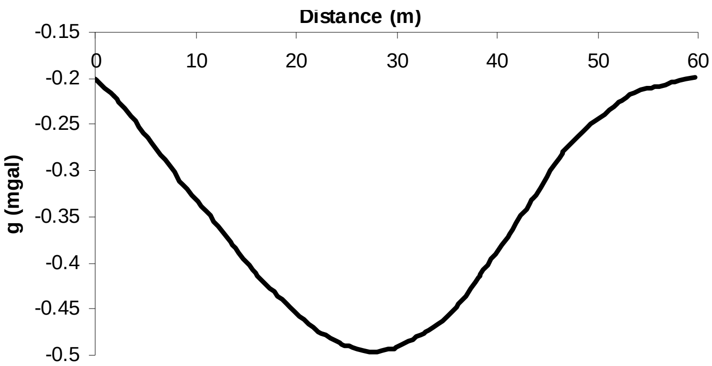
شکل ۱۱. نقشه موقعیت ناحیه مورد اکتشاف (دهلران).



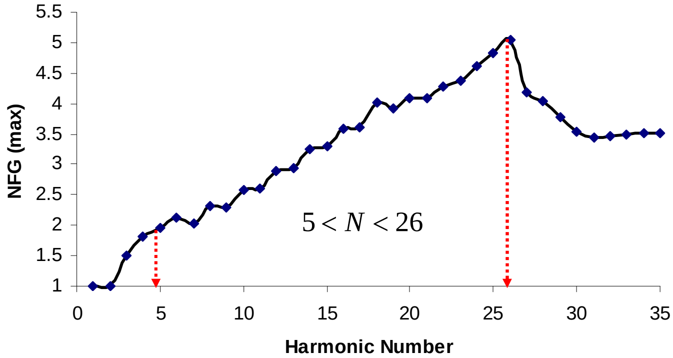
شکل ۱۲. نقشه بی‌هنجاری بازماند ناحیه برداشت شده.



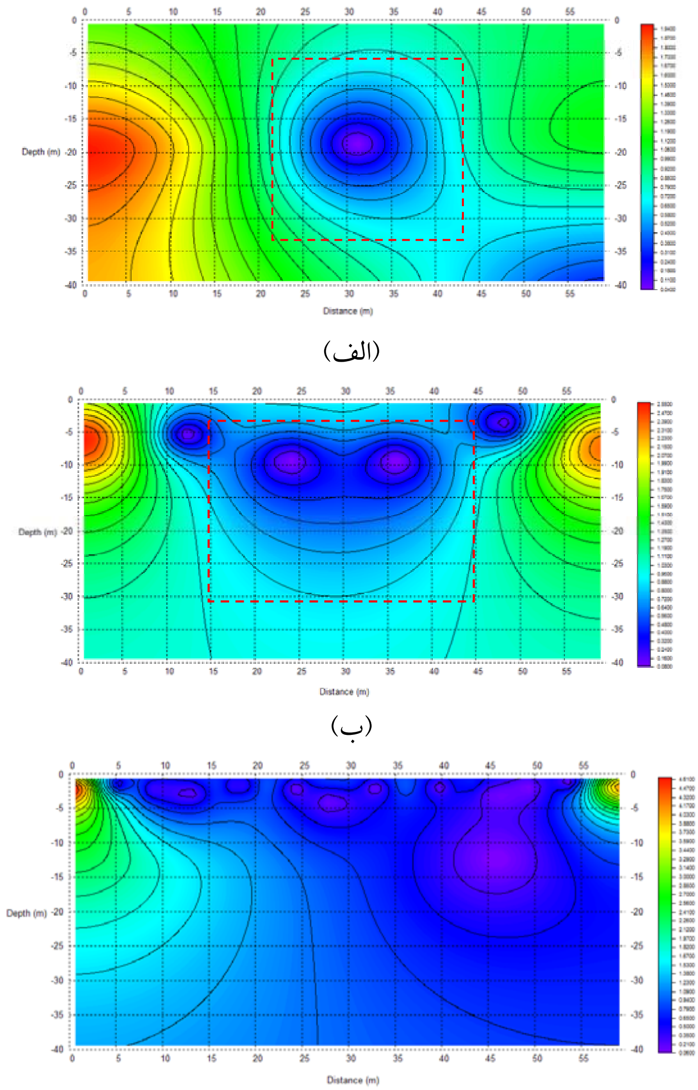
شکل۱۳. نقشه بی‌هنجاری بازماند بی‌هنجاری شماره ۱.



شکل۱٤. منحنی بی‌هنجاری بازماند مدل واقعی در طول نیم‌رخ AB.



شکل۱۵. نمودار رابطه بین N و NFG(max) برای مدل واقعی.

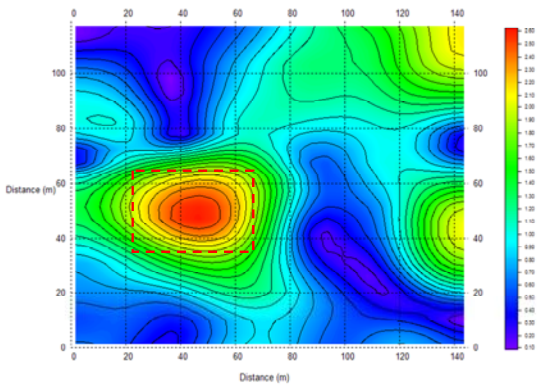


(الف)

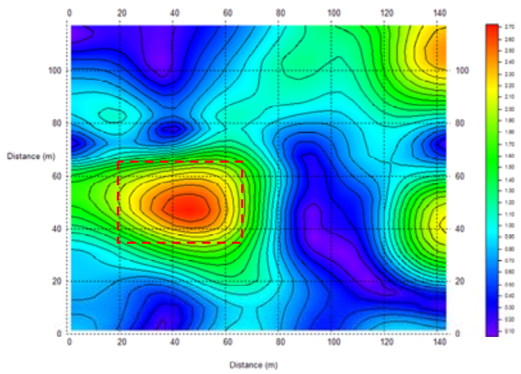
(ب)

(ج)

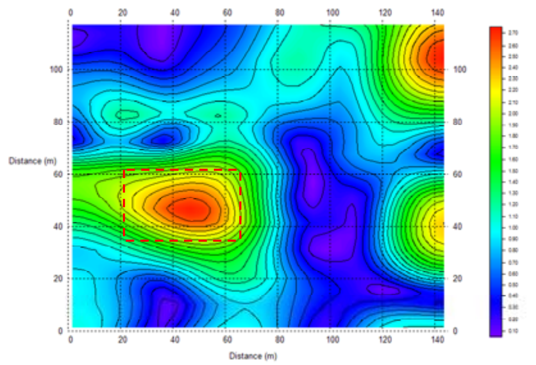
شکل۱٦. نقشه NFG حاصل از داده‌های واقعی، (الف) N = ۵، (ب) N = ۱۰ و (ج) N = ۲٦.



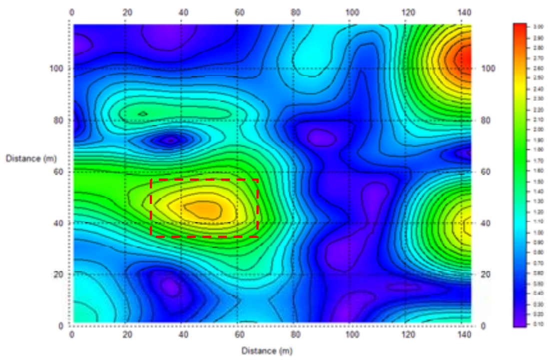
شکل۱۷. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق صفر.



شکل۱۸. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۵ متر.



شکل۱۹. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۱۰ متر.



شکل۲۰. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۱۵ متر.

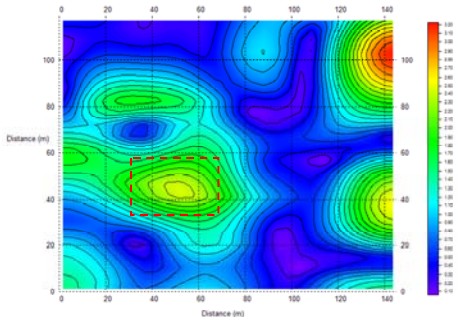
برای مدل واقعی نیز منحنی تغییرات عدد هماهنگ در رابطه NFG به‌دست می‌آید (شکل ۱۵). براساس این منحنی محدوده مناسب برای انتخاب پارامتر N، بین ۵-۲۶ است. نقشه NFG بعد از آزمایش پارامتر N در این محدوده (۵-۲۶)، حاکی از بهینه بودن این پارامتر در عدد ۵ است. در شکل ۱۶ نقشه NFG برای سه عدد هماهنگ ۵، ۱۰ و ۲۶ نشان داده شده است. برای عدد هماهنگ ۵، نقشه NFG مرکز توده، عمق بالا و پایین توده را به‌خوبی نشان داده است. عمق توده بین ۵-۱۰ متر است که تا حدود ۳۵ متر ادامه دارد. برای عدد هماهنگ ۱۰، نقشه NFG گستردگی توده را به‌خوبی نشان نداده است؛ و درعین‌حال در عدد هماهنگ ۲۶، خروجی مناسبی حاصل نشده است.

برای اینکه نحوه توزیع توده در عمق‌های متفاوت به‌دست آید، با استفاده از رابطه (۱۲)، نقشه NFG سه‌بُعدی در اعماق متفاوت رسم شد. در شکل‌های (۱۷-۲۶) این نقشه برای عمق‌های صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵، ۴۰ و ۴۵ متر نشان داده شده است. در هر کدام از این شکل‌ها محدوده توده با خط‌چین مشخص شده است.

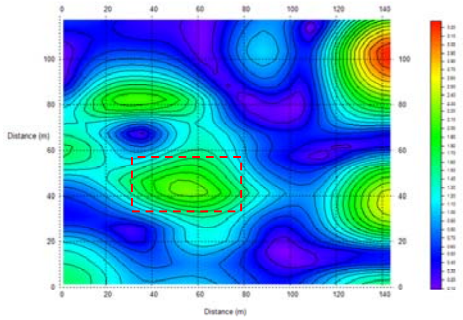
با توجه به نتایج روش NFG دوبُعدی، می‌توان حدس زد که عمق زغال بیتومینه دهلران بین ۵-۱۰ متر است و این توده تا عمقی حدود ۳۰-۳۵ متر ادامه دارد. نتایج حاصل از حفاری حاکی از محدوده عمقی بین ۸-۱۰ متر است که با خروجی این روش مطابقت دارد. با توجه به نقشه NFG سه‌بُعدی نیز می‌توان محدوده تقریبی توده را در عمق‌های متفاوت مشاهده کرد. همچنین با توجه به نقشه NFG سه‌بُعدی در شکل ۲۴، می‌توان پی‌برد که عمق نهایی توده تا این محدوده است زیرا در عمق ۳۵ متر، خروجی NFG در محدوده موردنظر نسبت به سایر عمق‌ها کم‌رنگ‌تر، و تباین مرز بی‌هنجاری با زمینه ضعیف‌تر شده

است. در شکل‌های (۲۵ و ۲۶)، به‌طورکلی گستردگی توده در این عمق‌ها از بین رفته است.

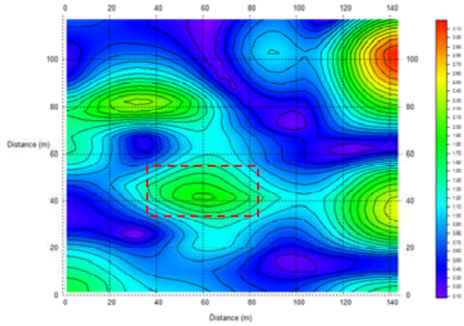
در همه حالت‌های بالا پارامتر ۱ = m در نظر گرفته شده است و خروجی روش به این پارامتر حساس نیست. دو نکته اساسی در به‌کارگیری روش گرادیان نرمال وجود دارد؛ اول اینکه خروجی روش NFG به میزان زیادی به انتخاب پارامتر عدد هماهنگ وابسته است و درصورتی‌که این پارامتر درست انتخاب نشود باعث برآورد نادرست محدوده عمقی می‌شود. نکته دوم در به‌کارگیری این روش، وجود شرط اساسی نسبت طول نیمرخ به عمق بالای توده است. برزکین (۱۹۷۳، ۱۹۹۸) و اردستانی (۲۰۰۴) به این نکته اشاره کرده‌اند که برای نسبت‌های بالاتر از ۱۰ بار، نتایج مدل‌سازی مناسب است و برای نسبت‌های کمتر، از دقت این روش کاسته می‌شود.



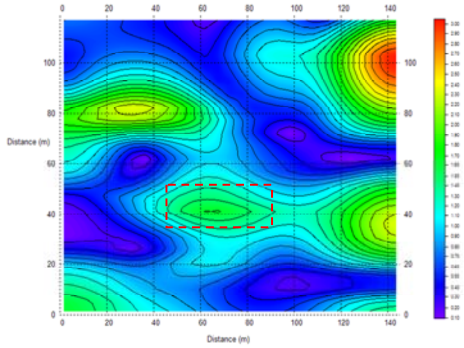
شکل ۲۱. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۲۰ متر.



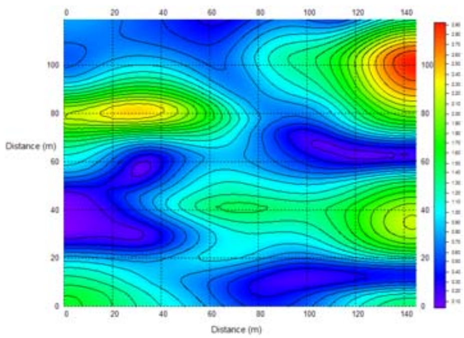
شکل ۲۲. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۲۵ متر.



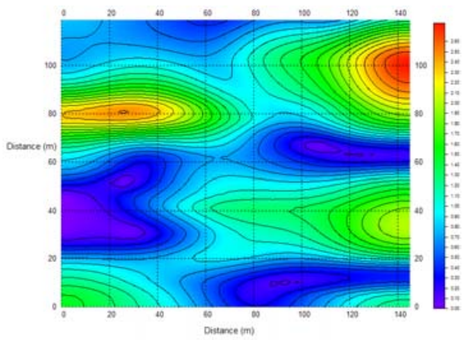
شکل ۲۳. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۳۰ متر.



شکل ۲٤. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ۳۵ متر.



شکل ۲۵. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ٤۰ متر.



شکل ۲٦. نقشه NFG سه‌بُعدی در عمق ٤۵ متر.

۵ نتیجه‌گیری

با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال شده، مرز تقریبی با زمینه و عمق مرکز و بالای توده مشخص می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها در به‌کارگیری روش، انتخاب صحیح عدد هماهنگ است که با استفاده از منحنی عدد هماهنگ –بیشینهٔ NFG مشخص می‌شود. برای رسیدن به جواب مناسب‌تر، لازم است که طول نیم‌رخ نسبت به عمق بالای نهشته به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. این روش برای مدل‌های مصنوعی نوفه‌دار و بدون نوفه آزمایش شد و بعد از اینکه نتایج رضایت بخشی به‌دست آمد، برای داده‌های زغال بیتومینه دهلران به کار رفت. خروجی حاصل از روش حاکی از این است که توده موردنظر دارای عمقی بین ۵–۱۰ متر و عمق نهایی توده نیز حدود ۳۰–۳۵ متر است. نتایج حفاری، عمق توده را بین ۸–۱۰ متر به صورت میانگین مشخص کرده است که با نتایج روش NFG مطابقت دارد.

تشکر و قدردانی

از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای در اختیار قرار دادن داده‌ها و همکاری صمیمانه، تشکر می‌کنیم.

منابع

سلاجقه، ف.، و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۵، برآورد عمق ناهنجاری‌های گرانی به کمک معادلهٔ همگن اویلر، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲، ص ۷۱–۸۱

Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2009, Normalizd full gradient of gravity anomaly method and its application to the Mobrun sulfide body, Canada. World Applied Science Journal **6**(3), 392-400.

Ardestani, V. E., 2004, Detection of near-surface anomalies through 2-D normalized full gradient of gravity data, J. Earth & Space Physics, **30**(2), 1-6.

Berezkin, W. M., 1967, Application of the full vertical gravity gradient to determination to sources causing gravity anomalies (in Russian), Expl, Geopys, **18**, 69-76.

Berezkin, W. M., 1973, Application of gravity exploration to reconnaissance of oil and gas reservoir (in Russian), Neda Publishing House Russia.

Berezkin, W. M., 1998, Full gradient method in geophysical prospecting (in Russian), Neda Publishing House Russia.

Blakely, R. J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge Univ. Press.

Osman, O., Albora, A. M., and Ucan, O. N., 2006, A new approach for residual gravity anomaly profile interpretations: Forced Neural Network (FNN), Annals of Geophysics, **49**(6), 1201-1208.

Osman, O., Albora, A. M., and Ucan, O. N., 2007, Forward modeling with Forced Neural Networks for gravity anomaly profile, Math. Geol., **39**, 593-605.

Plouff, D., 1975, derivation of formulas and FORTRAN program to compute gravity anomalies of prisms, National Technical Information Service PB, U. S. Department of Commerce, 243-526.

Salem, A., Ravat, D., Mushayandebvu, M. F., and Ushijima, K., 2004, Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry, Geophysics, **69**(3), 783-788.

Sindirgi, P., Pamukc¸U. O., and Ozyalin, S., 2008, Application of normalized full gradient method to self potential (SP) data, Pure Appl, Geophys, **165**, 409-427.

Xiao, Y., 1981, Normalized full gradient method of gravity anomalies (in Chinese), Oil Geophy, Prosp, **16**(3), 47-57.

Xiao, Y., and Zhang, L., 1984, Application of normalized full gradient method of gravity anomalies to oil and gas exploration (in Chinese), Oil Geophys, Props, **19**(3), 247-254.

Zeng, H., Meng, X., Yao, CH., Li, X., Lou, H., Guang, Z., and Li, Z., 2002, Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field east China, Geophy, **67**(4), 1138-1147.