برآورد عمق، ضریب دامنه و فاکتور شکل هندسی کانسار باریت با استفاده از وارون‌سازی غیرخطی نامقید داده‌های گرانی‌سنجی

سمیرا قلعه‌نویی و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی*

مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۹ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱/۲۲)

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوفیزیک، برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی ساختار مدفون است که با استفاده از برگردان بی‌هنجاری گرانی بازماند یا مشاهده‌ای صورت می‌گیرد. از جمله این پارامترها می‌توان به عمق ، ضریب دامنه و فاکتور شکل هندسی اشاره کرد. در این مقاله روش جدیدی برمبنای مدل‌سازی وارون غیرخطی نامقید برای برآورد عمق، ضریب دامنه و فاکتور شکل یک ساختار مدفون، با توجه به بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده (ترکیبی از بی‌هنجاری منطقه‌ای و مانده) مربوط به کره، استوانه افقی و قائم مطرح شده است. ابتدا با استفاده از مدل‌های مصنوعی دقت و صحت روش پیشنهادی بررسی و پس از تأیید روش، از آن برای برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی موردنیاز برای اکتشاف کانسار باریت در منطقه آباده استفاده شده است که نتایج حاصل با نتایج مربوط به حفاری و سایر روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش تفسیری اویلر هم‌خوانی و تطابق قابل‌توجهی داشته است.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری گرانی، مدل‌سازی ریاضی، اکتشاف کانسارهای طبیعی، برآورد عمق، تابع جبران، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده سازگار

Depth, amplitude coefficient and geometrical shape factor estimation of barite's ore-body by nonlinearly unconstrained inversion of gravity data

Samira Ghalenovi and Vahid Ebrahimzadeh Ardestani*

Institute of Geophysics,University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: Feburary 8, 2014, accepted: April 11, 2015)

Summary

One of the most important exploration problems in geophysics is to estimate the geophysical parameters from the observed or residual gravity anomaly related to a buried structure, such as depth, amplitude coefficient and geometrical shape factor. The gravity anomaly expression produced by a simple geometrically shaped model (sphere or cylinder) can be represented by

* Corresponing author ebrahimz@ut.ac.ir *نگارنده رابط:

an appropriate analytical formula. Several interpretative methods have been developed to interpret gravity field data assuming a fixed simple geometrical model such as a sphere, a horizontal cylinder or a vertical cylinder. In most cases, these methods consider the geometrical shape factor of the buried body to be *a priori* assumed, and the depth variable may thereafter be obtained by graphical methods applied to the residual anomaly. However, only a few methods have been developed to determine the shape of the buried structure from the residual gravity anomaly. Consequently, the accuracy of the results obtained by these methods depends on the accuracy within which the residual anomaly can be separated from the observed gravity anomaly. In this study, a new and simple method has been developed to estimate the depth, amplitude coefficient and geometrical shape factor of a buried structure from the observed (composite) or residual gravity anomaly related to a cylinder or sphere-like structure. The method is based on nonlinearly constrained mathematical modeling and also stochastic optimization approaches. This method consists of three main steps: The first step is oriented to formulate a nonlinearly constrained optimization model (*NCOM*) which mathematically describes the geophysical gravity problem related to the studied structure. The (*NCOM*) model is to optimize a mathematical objective function on an unbounded subset (defined by mathematical inequalities constrains in which the geophysical parameters are generally surmised to satisfy) contained in the free geophysical parameters. Ignoring these mathematical constrains probably leads to general error estimations of the parameters. In this research, the objective function was taken as the statistical likelihood function which depends on the deviations between the observed and synthetic points and also on the number of observations. The second step is directed to suggest an interior penalty function to transform the (*NCOM*) model into a nonlinearly unconstrained optimization one (*NUOM*). The goal of using the penalty function is to eliminate the constraints of the (*NCOM*) model and make them reactive in a new target function of the (*NUOM*) model. The target function of the (*NUOM*) model considers both the objective function of the (*NCOM*) model and the suggested interior penalty function. The third step is to solve the (*NUOM*) model by the adaptive simulated annealing algorithm, a stochastic approach, well-known for optimizing numerical functions of several real decision variables. The obtained solution of the (*NUOM*) model includes the geophysical gravity parameters of the studied structure such as: depth, amplitude coefficient and shape factor. A statistical analysis has been carried out to demonstrate the accuracy and the precision of the suggested interpretative method. We applied this method to some theoretical synthetic examples in order to evaluate the precision of the suggested method. We also used the method to estimate the mentioned parameters for the gravity anomaly of the Abadeh site. The obtained results had an appropriate agreement with other methods.

Keywords: Gravity anomaly, mathematical modeling, mineral exploration, depth estimation, penalty function, adaptive simulated annealing algorithm

۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل اکتشافی در ژئوفیزیک برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی با توجه به بی‌هنجاری گرانی مانده یا مشاهده‌ای مربوط به ساختار مدفون- از جمله عمق، ضریب دامنه و فاکتور شکل هندسی است. بی‌هنجاری گرانی حاصل از مدل هندسی ساده (کره یا استوانه) را می‌توان با فرمول تحلیلی مناسبی بیان کرد. این تابع‌های به فرمول در آمدهٔ ریاضی به عمق و فاکتور شکل هندسی و نیز ضریب دامنه (که با شعاع و تباین چگالی ساختار مدفون تغییر می‌کند) وابسته هستند.

چندین روش تفسیری برای تفسیر داده‌های میدان گرانی-که در آنها داشتن مدل هندسی ثابت فرض اولیه

است- وجود دارد. در بیشتر موارد، این روش‌ها فاکتور شکل هندسی ساختار مدفون را درحکم فرض اولیه در نظر می‌گیرند و تغییر عمق را با اِعمال روش‌های گرافیکی بر بی‌هنجاری گرانی مانده (نتلتون، ۱۹۷۶ و ۱۹۶۲) ، تبدیل فوریه (اودگارد و برگ، ۱۹۶۵)، تبدیل ملین (موهان و همکاران، ۱۹۸۶)، روش‌های کمینه‌یابی حداقل مربعات (گوپتا، ۱۹۸۳؛ عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۹۱) به‌دست می‌آید. اگرچه تنها روش‌های اندکی برای تعیین شکل ساختار مدفون با استفاده از بی‌هنجاری گرانی مانده از جمله: تبدیل والش (شاو و آگراوال، ۱۹۹۰)، روش‌های کمترین مربعات (عبدالرحمن و شرف‌الدین، ۱۹۹۵؛ عبدالرحمن و همکاران، ۲۰۰۱) وجود دارد، به‌طورکلی، تعیین عمق، ضریب دامنه و فاکتور شکل هندسی ساختار مدفون با اِعمال روش‌های پیش‌گفته بر بی‌هنجاری گرانی مانده به‌دست می‌آید. در نتیجه، دقت نتایج حاصل از این روش‌ها وابسته به دقت جدایش بی‌هنجاری محلی و منطقه‌ای است.

در این مقاله روشی جدید و ساده برای برآورد عمق، ضریب دامنه و فاکتور شکل یک ساختار مدفون با توجه به بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده یا مانده مربوط به یک کره، استوانه افقی و استوانه قائم مطرح خواهد شد. این روش بر مبنای مدل‌سازی ریاضی غیرخطی نامقید و همچنین روش‌های برآورد تصادفی است. در این مدل‌سازی ابتدا مسئله موردنظر را در فضای پارامترهای ژئوفیزیکی فرمول‌بندی می‌کنند، به آن قیدهای موردنیاز برای یکتایی جواب اضافه می‌شود و درنهایت با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی سازگار(ASA) حل می‌شود که جواب‌های حاصل همان پارامترهای موردنیاز برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی است.

۲ روش تحقیق

حل مسائل بهینه‌سازی با تابع هزینه‌های ناهموار و یا چندحالته از جمله کاربردهای تحلیل سیگنال به حساب می‌آید. الگوریتم‌های گرادیان محور که از جمله الگوریتم‌های کارآمد محسوب می‌شوند، در این گونه مسائل به علت وجود مسئله کمینه‌های محلی و یا دشواری در محاسبه گرادیان‌ها، ناکارآمد هستند. روش‌های بهینه‌سازی که به گرادیان نیازی ندارند و می‌توانند بهینه کلی را به‌دست دهند، مزایای قابل‌توجهی در حل چنین مسائل بهینه‌سازی دشواری دارند. دو نمونه مشهور از چنین روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده (SA) هستند. تبرید شبیه‌سازی شده شامل جوابی منفرد در فضای پارامتر با اصول هدایت‌کننده خاصی است که از رفتار تصادفی مولکول‌ها در فرایند تبرید پیروی می‌کند. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده روش بهینه‌سازی کلی را با برخی ویژگی‌های مثبت و منفیِ برجسته عرضه می‌کند. این الگوریتم معمولاً شامل پارامترهای اندکی است که نیازمند تنظیم شدن هستند. علاوه‌براین، تضمین آماری آن برای همگرایی، می‌باید آن را به روشی بسیار کارآمد مبدل سازد. اما، یکی از جدی‌ترین ایرادات این الگوریتم، کند بودن فرایند محاسباتی است. در بسیاری از مسائل مورد بررسی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده استاندارد اغلب نیازمند ارزیابی‌های بسیار زیادی از تابع هدف برای همگرایی در مقایسه با الگوریتمی کاملاً تنظیم شده است. ولی، نوع پیشرفته تبرید شبیه‌سازی شده یعنی تبرید شبیه‌سازی شده سازگار، پیشرفت چشمگیری در سرعت همگرایی نسبت به نمونه استاندارد تبرید شبیه‌سازی شده فراهم کرده است و نیز همه مزیت‌های الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده را به همراه دارد (جانسون و همکاران، ۱۹۸۷).

یکی از هدف‌های اصلی وارون‌سازی در ژئوفیزیک، چه درنظریه‌های احتمال و چه کلاسیک، یافتن کمینه خطا

در تابع خطا $E(m)$ است که در آن m بردار مدل است.

روش‌های بهینه‌سازی محلی از قبیل روش‌های خطی تکرارکننده با این فرض که کمینه مقدار سطح خطا به‌خوبی تعریف شده باشد، مدل‌ها را با به‌روزرسانی محاسبه می‌کند. لذا به یکتایی جواب حاصل کمک شایانی می‌شود. هر به‌روزرسانی در مدل موردنظر فقط زمانی قابل پذیرش است که خطای محاسبه شده برای مورد به‌روز شده کمتر ازخطای مدل قبلی باشد. این نظریه هنگامی که سطح خطا چندین نقطه بیشینه یا کمینه داشته باشد، رد می‌شود. این روش‌ها همواره نزدیک‌ترین مقدار کمینه به مدل اولیه را پیدا می‌کنند. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده روشی به‌منظور تعیین مقدار کمینه کلی برای تابع $E(m)$ است. این روش در تعداد زیادی از مسائل بهینه‌سازی مفید خواهد بود و در همه آنها، این الگوریتم شامل یافتن مقادیر بهینه (کمینه و بیشینه) ازتابعی با تعداد زیادی متغیر مستقل است. مسائل وارون‌سازی در ژئوفیزیک شامل پیداکردن کمینه تابع خطا $E(m)$ است که معمولاً تابعی از تعداد زیادی از متغیرها (برای مثال شاخص‌های مدل) است. در نتیجه این الگوریتم به‌طور موفقیت‌آمیزی در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی مورداستفاده قرار گرفته است (کرک پاتریک و همکاران، ۱۹۸۳؛ جانسون و همکاران، ۱۹۸۷).

تبرید شبیه‌سازی شده سازگار پارامتر α_k^i را در بُعدِ i در نظر می‌گیرد که در هر زمان تبرید در طیف زیر:

$$\alpha_k^i \in [A_i, B_i], \qquad (۱-۲)$$

تولید و با استفاده از متغییر تصادفی y^i به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \alpha_{k+1}^i &= \alpha_k^i + y^i (B_i - A_i), \\ y^i &\in [-1,1]. \end{aligned} \qquad (۲-۲)$$

تابع تولید $g_T(y)$ را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

(۳-۲)

$$g_T(y) = \prod_{i=1}^{D} \frac{1}{2(|y^i| + T_i)\ln(1+\frac{1}{T_i})} = \prod_{i=1}^{D} g_T^i(y^i).$$

توزیع احتمال مجموع چنین تابع تولیدی به‌صورت زیر خواهد بود:

(۴-۲)

$$G_T(y) = \int_{-1}^{y^i} \dots \int_{-1}^{y^D} dy'...dy'^D g_T(y') \equiv \prod_{i=1}^{D} G_T'(y'),$$

$$G_T^i(y^i) = \frac{1}{2} + \frac{\operatorname{sgn}(y^i)}{2} \frac{\ln(1+|y^i|/T_i)}{\ln(1+1/T_i)}.$$

y^i نیز با استفاده از متغیر u^i حاصل از توزیع واحد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۵-۲)

$$\begin{aligned} &u^i \in U[0,1], \\ &y^i = \operatorname{sgn}(u^i - \frac{1}{2}) T_i \left[\left(1 + 1/T_i\right)^{|2u^i - 1|} - 1 \right]. \end{aligned}$$

لذا محاسبه برنامه تبرید T_i به‌صورت زیر خواهد بود:

$$T_i(k) = T_{0i} \exp(-c_i k^{1/D}), \qquad (۶-۲)$$

و درنتیجه می‌توان کمینه کلی را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\sum_{k_0}^{\infty} g_k \approx \sum_{k_0}^{\infty} \left[\prod_{i=1}^{D} \frac{1}{2|y_i| c_i} \right] \frac{1}{k} = \infty. \qquad (۷-۲)$$

با انتخاب پارامتر c_i درحکم پارامتر کنترل‌کننده الگوریتم، داریم:

$$T_{fi}=T_{0i}\exp(-m_i),$$
$$k_f=\exp(n_i), \qquad (۸-۲)$$
$$c_i=m_i\exp(-n_i/D)$$

که m_i و n_i درحکم پارامترهای آزاد برای کمک به تنظیم تبرید شبیه‌سازی شده سازگار برای مسائل خاص استفاده قرار می‌شود (اینگبر، 1993a, b).

پارامتر جدید α_{k+1}^i برحسب مقدار قبلی آن، یعنی α_k^i به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha_{k+1}^i=\alpha_k^i+y^i(B_i-A_i), \qquad (۹-۲)$$

که مقید به شرط زیر است:

$$\alpha_{k+1}^i\in[A_i,B_i]. \qquad (۱۰-۲)$$

مقدار احتمال پذیرش پارامتر جدید α_{k+1}^i مطابق فرمول (۲-۱۱) محاسبه می‌شود:

(۱۱-۲)

$$P_{accept}=\frac{1}{1+\exp\left[\left(g(a_i^{k+1})-g(a_i^k)\right)\Big/T_{accept}(k_i)\right]}$$

متغیر تصادفی P_{unit} به منزلهٔ شرطی کنترل‌کننده در بازه $[0,1]$ تولید می‌شود. اگر شرط $P_{unit}<P_{accept}$ برقرار باشد ، a_i^{k+1} مورد پذیرش قرار می گیرد و در غیر این صورت رد خواهد شد (اینگبر، ۱۹۹۳، ۱۹۹۶، ۲۰۱۱).

عبارت بی‌هنجاری گرانی میدان ترکیبی یا مشاهده شده کلی که به واسطهٔ ساختارهای زمین شناسی بسیار ساده از جمله کره، استوانه افقی و استوانه قائم (شکل ۱) ایجاد می‌شود، به‌صورت زیر مطرح شده است (گوپتا، ۱۹۸۳):

$$V(x)=a\frac{z}{\left((x-x_0)^2+z^2\right)^q}+P(x) \qquad (۱۲-۲)$$

که در آن داریم:

(۱۳-۲)

$$q=\begin{cases}1.5 & for\ a\ sphere\\ 1.0 & for\ a\ horizontal\ cylinder\\ 0.5 & for\ a\ vertical\ cylinder\end{cases}$$

and

$$a=\begin{cases}\frac{4}{3}\pi G\rho R^3 & for\ q=1.5\\ 2\pi G\rho R^2 & for\ q=1.0\\ \pi G\rho R^2 & for\ q=0.5\end{cases}$$

در معادله (۲-۱۲)، z عمق نامشخص تا مرکز جسم هندسی (کره یا استوانه افقی) یا عمق تا بالای جسم (استوانه قائم)، q فاکتور شکل هندسی، a ضریب دامنه، x مختصات مکان، x_0 مختصات افقی منبع، ρ تباین چگالی بین جسم هندسی و سنگ میزبان، G ثابت جهانی گرانش و R شعاع ساختار مدفون است.

مولفه اول از معادله (۲-۱۲) یعنی $a\frac{z}{\left((x-x_0)^2+z^2\right)^q}$ نشان دهنده بی‌هنجاری گرانی بازماند $\Delta V(x)$ و عبارت دوم یعنی $P(x)$، به‌صورت چندجمله‌ای با درجه مثبت $l\geq 0$، نشان‌دهنده بی‌هنجاری گرانی منطقه‌ای است که در این مقاله از چند جمله‌ای درجه اول برای مدل‌سازی بی‌هنجاری منطقه‌ای درمدل‌های مصنوعی بهره جسته‌ایم.

ارزیابی پارامترهای گرانی ژئوفیزیکی یعنی (a,z,q,x_0) همچون اطلاعات مربوط به میدان منطقه‌ای با استفاده از داده‌های گرانی ترکیبی مسئله‌ای بسیار دشوار است. لذا هدف اصلی این پژوهش ارزیابی هم‌زمان پارامترهای مربوط به ساختار مدفون با استفاده از

بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده به کمک حل مدل بیشینه مقید غیرخطی زیر است (اصفهانی و تلاس، ۲۰۰۴):

(۲-۱۴)

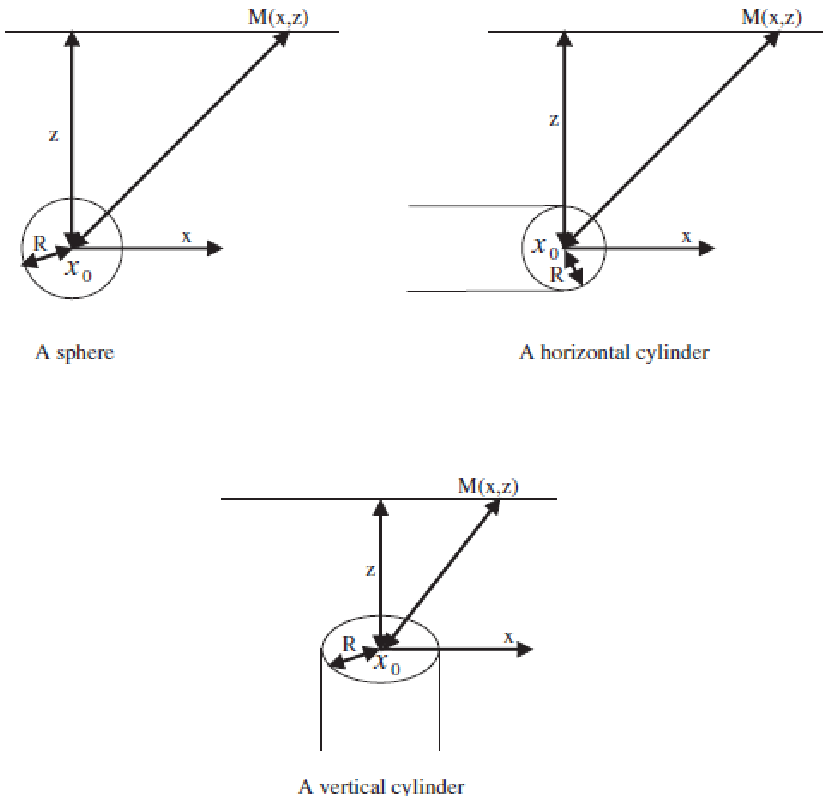
$$Maximize\ LH\left(a,z,q,x_0,s\right)=$$
$$\prod_{i=1}^{N}\frac{1}{s\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{e_i-\bar{e}}{s}\right)^2} \qquad (NCOM)_1$$

که شرایط حاکم بر آن به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} & z\geq 0, \\ & 0.5\leq q\leq 1.5, \\ & -\infty < a < +\infty, \\ & -\infty < x_0 < +\infty \end{aligned} \qquad (۲-۱۵)$$

برای رابطه (۲-۱۴) داریم:

N تعداد نقاط مشاهده، $e_i=\left(L(x_i)-V(x_i)\right)\ \ (i=1,...,N)$ اختلاف بین مقادیر مشاهده شده $L(x_i)\ \ (i=1,...,N)$ و مقادیر محاسبه شده حاصل از پاسخ مدل $V(x_i)\ \ (i=1,...,N)$ در نقاط گسسته $x_i\ \ (i=1,...,N)$ است. تابع هدف $LH\left(a,z,q,x_0,s\right)$ از مدل ریاضی $(NCOM)_1$ به مثابهٔ تابع احتمال آماری شناخته می‌شود. متغیر $e=(e_1,e_2,...,e_N)^T$ متغیری تصادفی است و مطابق با توزیع گاوسی (نرمال) است. متغیرهای $\bar{e}$ و s به‌ترتیب میانگین حسابی و انحراف استانداردِ مانده $\bar{e}=0\ (i=1,...,N)$ (خطای استاندارد) هستند.



شکل ۱ . نمایش ساختارهای هندسی ساده (کره و استوانه) (گوپتا، ۱۹۸۳).

مدل ریاضی (۲-۱۴) طی مراحل ریاضی مشخص به مدل کمینه نامقید غیرخطی تبدیل می‌شود. به علت غیرخطی بودن مسئله، جواب‌های حاصل از وارون‌سازی، نایکتا هستند. لذا با معرفی تابع هدف جدید $\varphi(a,z,q,x_0,s)$ محاسبات ساده‌تر می‌شود و یکتا نبودن جواب با استفاده از محاسبه مقدار احتمال و مقایسه آن با پارامترکنترل تعریف شده کاربر، تا حدودی مرتفع خواهد شد. تابع $\varphi(a,z,q,x_0,s)$ هر دو تابع هدف $f\left(a,z,q,x_0,s\right)$ مربوط به مدل $(NCOM)_4$ و نیز تابع جبران لگاریتمی پیشنهادی را در بر دارد. تابع جبران با استفاده از قیدهای محدود مسئله مورد بررسی (رابطه (۵-۱۵)) تعریف می‌شود. تابع هدف جدید درنهایت به‌صورت زیر تعریف خواهد شد (اصفهانی و تلاس، ۲۰۰۴):

$$\phi(a,z,q,x_0,s) = f(a,z,q,x_0,s) - r\times\sum_{i=1}^{m} Ln\,(g_i) \qquad (۲-۱۶)$$

که در رابطه فوق داریم:

$$g_1 = z, \quad g_2 = q-0.5, \quad g_3 = 1.5-q, \qquad (۲-۱۷)$$

و نیز m تعداد قیدها $g_i(i=1,...,m=3)$ و r (فاکتور جبران) عددی حقیقی مثبت و اختیاری است که مقداری نزدیک به صفر دارد و در این پژوهش برابر با $1/N$ در نظر گرفته می‌شود (اینگبر، ۲۰۱۱).

با استفاده از تابع هدف جدید (رابطه (۲-۱۵))، مدل (۲-۱۳) به مدل زیر تبدیل خواهد شد (اصفهانی و تلاس، ۲۰۰۴): (۲-۱۸)

$$Minimize\ \phi(a,z,q,x_0,s) \quad (NUOM)$$

که برای این مدل شرط زیر برقرار است:

$$(a,z,q,x_0,s)\in\Re^5 \qquad (۲-۱۹)$$

که تابع هدف مدل $(NUOM)$ فوق به‌صورت زیر است:

(۲-۲۰)

$$\phi(a,z,q,x_0,s) = N\,Ln\left(s\sqrt{2\pi}\right) + \frac{1}{2s^2}\sum_{i=1}^{N}\left(L(x_i) - a\frac{z}{\left(\left(x_i-x_0\right)^2 - z^2\right)^q} - P(x_i)\right)^2 - r\times\left(Ln(z) + Ln(q-0.5) + Ln(1.5-q)\right).$$

سپس، مدل ریاضی $(NUOM)$ با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی تصادفی تبرید شبیه‌سازی شده سازگار حل خواهد شد (اصفهانی و تلاس، ۲۰۰۴).

شایان ذکر است که در این روش، انتخاب پارامترهای اولیه درحکم پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم از سوی کاربر صورت می‌گیرد. این اطلاعات اولیه نقشی در مقدار نهایی محاسبه شده با الگوریتم ندارد؛ زیرا الگوریتم توانایی بازگردان مقدار واقعی مربوط به بی‌هنجاری را دارد. برای مثال حتی اگر مقدار اولیه برای فاکتور شکل هندسی وارد شده از سوی کاربر برای مدل استوانه قائم برابر ۲/۵ باشد، الگوریتم طی اجرای مراحل گوناگون و با عبور از شرط‌های تعبیه شده برای پذیرش یا نپذیرفتن مقادیر محاسبه شده درنهایت مقدار ۰/۵ با درصد خطای قابل‌قبولی را می‌دهد. در ادامه برای بررسی کارآیی روش عرضه شده، آن را بر داده‌های مصنوعی اِعمال می‌کنیم.

۲-۱ داده‌های مصنوعی

۲-۱-۱ مدل تک‌چشمه

در اینجا برای دو مدل مصنوعی کره و استوانه قائم (x_0 معرف موقعیت مرکز مدل است) با احتساب درصد نوفه‌های اتفاقی ۵ و ۷ و ۱۰٪ روش پیشنهادی را اِعمال می‌کنیم. برای این دو مدل صورت کلی بی‌هنجاری منطقه‌ای را به شکل چندجمله‌ای درجه اول (خطی) با

ضرایب ثابت مشخص (k1,k2) در نظر می‌گیریم. البته باید اذعان داشت که برگردان پارامترهای مربوط به اثر منطقه‌ای هم‌زمان با پارامترهای عمق، فاکتور شکل و ضریب دامنه مربوط به مدل صورت می‌گیرد.

نتایج حاصل از اِعمال روش به شرح جدول‌های ۱ و ۲ است (به‌ترتیب برای مدل کره و استوانه قائم) و با توجه به شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده شد که نتایج، توافق مناسبی با مقادیر مفروض اولیه دارد. همچنین مقدار احتمال پذیرش برای ۹۵٪ موارد 0/9 به‌دست آمده که بزرگ‌تر از پارامتر کنترل برابر با 0/05 و مبین این نکته است که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه شده با استفاده از این روش زیاد نیست و از نظر آماری مشابه هم هستند.

همان‌طورکه در جدول ۱ دیده می‌شود، با اِعمال روش مورد بحث بر داده‌های بدون نوفه، نتایج با خطای ناچیز (در محدوده قابل‌قبول و با توجه با مقدار عددی تعریف شده برای سطح نبود پذیرش در الگوریتم) به‌دست آمده و توافق قابل‌قبولی با مقادیر اولیه دارند. ازآنجاکه درواقعیت عوامل گوناگونی بر کیفیت داده‌های برداشت شده تاثیر می‌گذارد، برای آزمودن دقت این روش، آن را بر داده‌های مدل ۱ که با نوفه‌های اتفاقی ۵، ۷ و ۱۰٪ آغشته شده‌اند نیز اِعمال می‌کنیم که نتایج این اِعمال نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. برای نوفه‌های ۵، ۷ و ۱۰٪ به‌ترتیب مقادیر ۰/۹۵، ۰/۹۴ و ۰/۹۳ برای پارامتر احتمال پذیرش به‌دست آمده است که با مقایسه این مقادیر با بزرگی پارامتر احتمال نپذیرفتن (برابر با ۰/۰۵)، این نکته بدیهی است که نتایج ما دقت مطلوب را دارند.

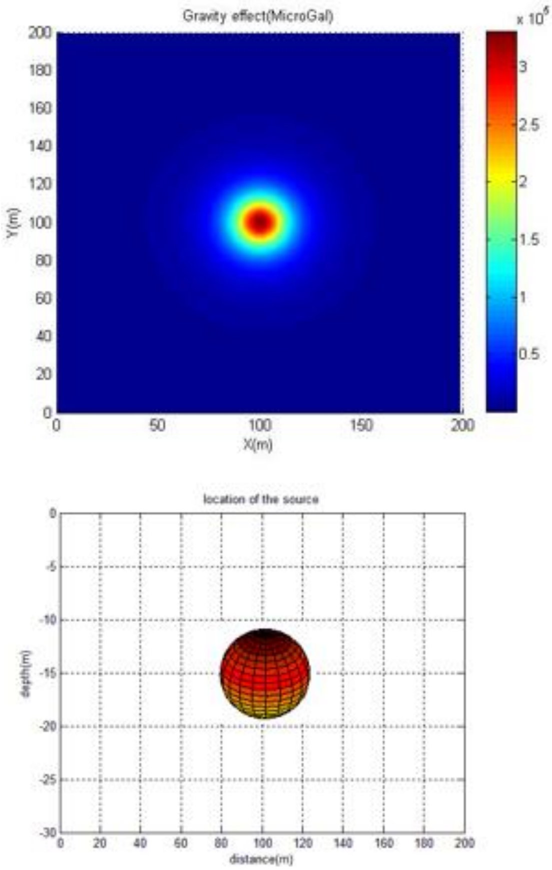
به‌منظور کسب اطمینان ازتطابق این نتایج با مقادیر اولیه، نتایج حاصل از داده آغشته با نوفه‌های ۵، ۷، و ۱۰٪ را درحکم نمونه با مقادیر واقعی به‌طور تصویری مقایسه می‌کنیم که شکل ۳ گواه توافق و تشابه زیاد این نتایج است.

جدول۱. نتایج حاصل از اِعمال مدل مصنوعی کره در عمق ۱۵ متر.

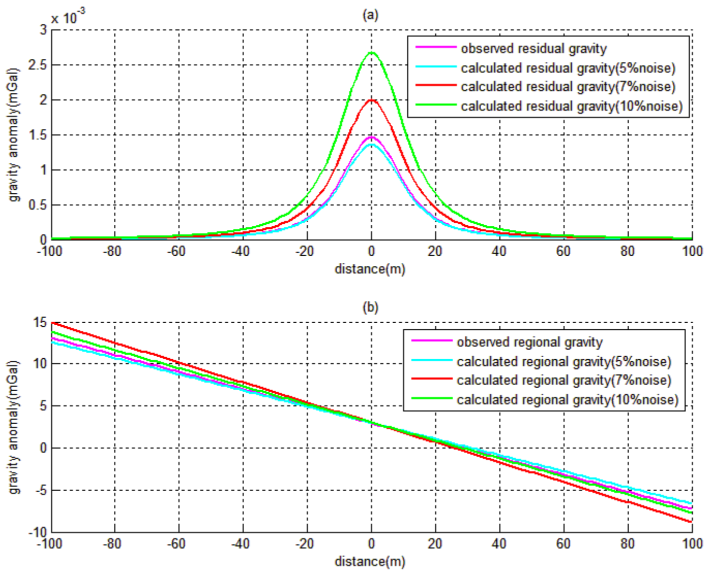
پارامترهای گرانی	مقادیر اولیه	مقادیر ارزیابی شده بدون نوفه	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۵٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۷٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۰٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۵٪
a	0/37	0/3701	0/3712	0/3730	0/3751	0/3758
z	15	14/9239	15/1620	15/0181	15/1026	13/8154
q	1/5	1/5244	1/5324	1/4048	1/4087	1/4979
x_0	0/00	0/0389	0/0590	0/0346	0/1230	0/0833
$k1$	-0/1	-0/1018	-0/0961	-0/1185	-0/1073	0/0411
$k2$	3/00	2/9916	2/9809	3/0320	3/1367	2/5578

جدول۲. نتایج حاصل از مدل مصنوعی استوانه قائم در عمق ۱۲ متر.

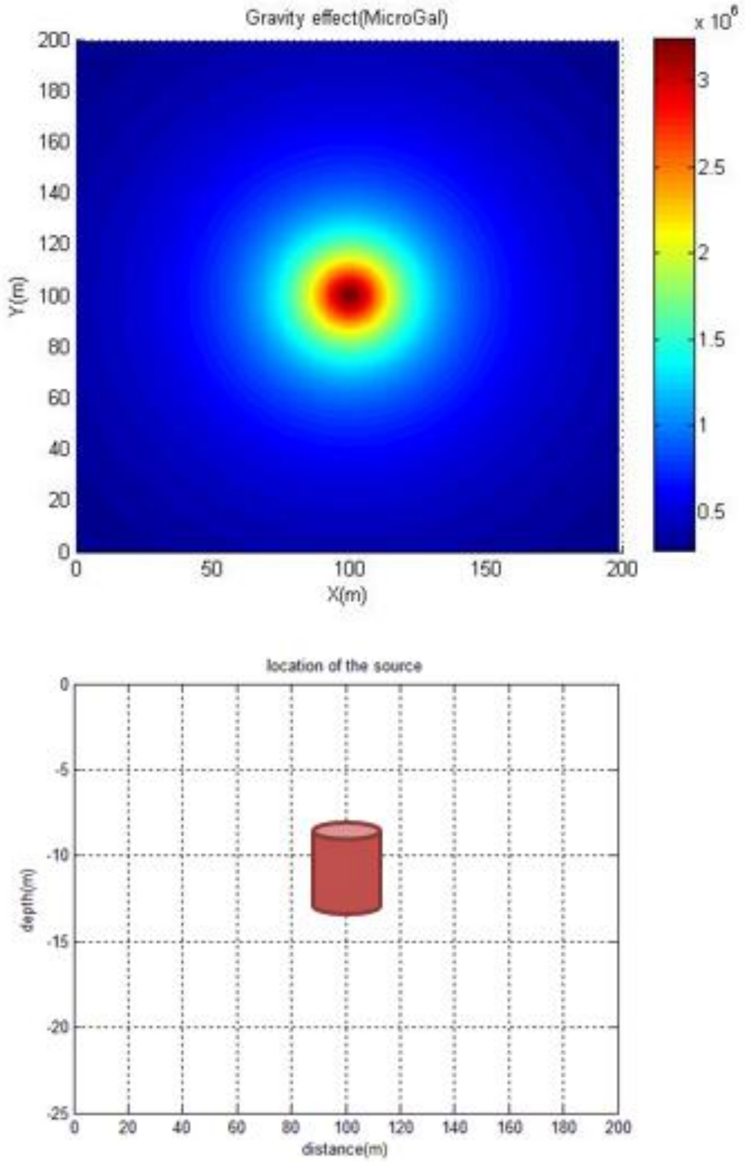
پارامترهای گرانی	مقادیر اولیه	مقادیر ارزیابی شده بدون نوفه	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۵٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۷٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۰٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۵٪
a	۰/٤١	۰/٤١٠٨	۰/٤١١٠	۰/٤١١١	۰/٤١١٥	۰/٤١١٨
z	١٢/۰۰	١١/٩٩٧٠	١١/٩٩٧٠	١١/٩٩٦٩	١١/٩٨٦٠	١١/٩٣٣٢
q	۰/٤٩٤٣	۰/٤٦٣١	۰/٥١٦٢	۰/٤٥٦٢	۰/٤٥٨٥	۰/٥۰٢٤
x_0	۰/۰۰	۰/۰١۰٣	۰/٥٢٣۰	۰/١۰٩٧	۰/١۰١١	۰/۰٣٦٧
$k1$	−٢/٥	−٢/٤٦٢٩	−٢/٤٢٥١	−٢/٦٣٧٨	−٢/٤٧١٩	−٢/٤٣٧٢
$k2$	٢/۰۰	١/٩۰٧٩	١/٧٤٦۰	١/٨۰۰٩	١/٧٥٢٦	١/٧٦٧٨



شکل۲. بی‌هنجاری گرانی بازماند مدل۱ (کره به قطر ٤ متر واقع در عمق ۱۵ متری از سطح زمین).



شکل ۳. نمایشی طرحوار ازمقایسه منحنی‌های بی‌هنجاری ترکیبی (بی‌هنجاری منطقه‌ای و محلی) ارزیابی شده و اولیه مدل کره.



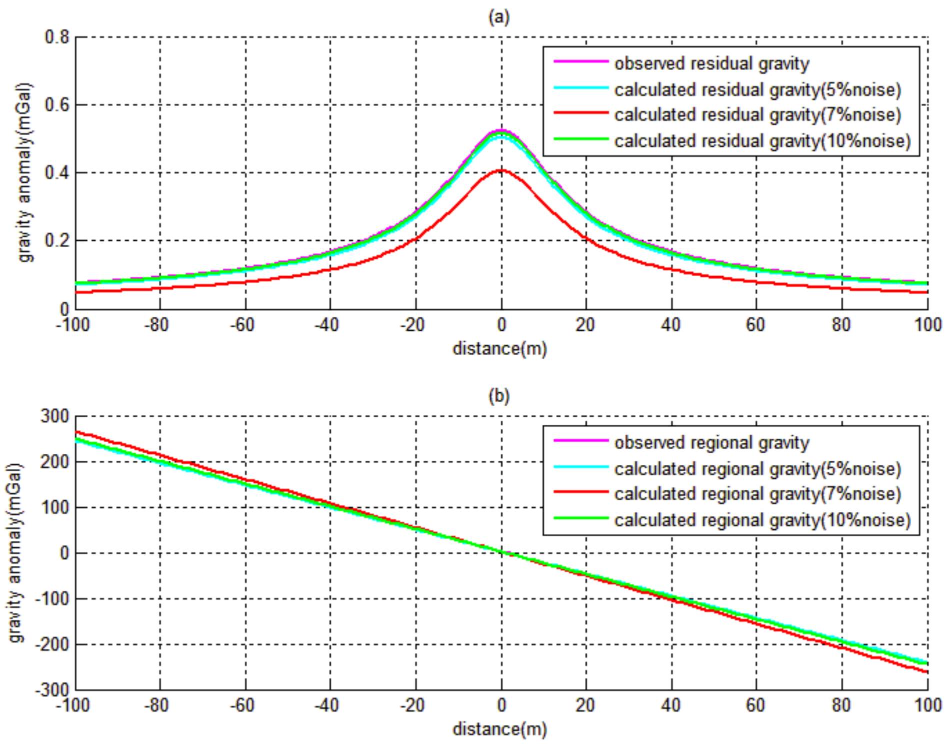
شکل ٤. بی‌هنجاری گرانی بازماند مدل۲ (استوانه قائم به قطر ٦ متر واقع در عمق ۱۲ متری از سطح زمین).

همان‌طورکه ازجدول ۲ دیده می‌شود، با اِعمال روش مورد بحث بر داده‌های بدون نوفه، نتایج با خطای بسیار ناچیز به‌دست می‌آیند و توافق قابل‌قبولی با مقادیر اولیه دارند. ازآنجاکه درواقعیت عوامل گوناگونی بر کیفیت داده‌های برداشت شده تاثیر می‌گذارد، برای آزمودن دقت این روش، آن را بر داده‌های مدل ۲ که با نوفه‌های اتفاقی ۵، ۷ و ۱۰ ٪ آغشته شده‌اند نیز اِعمال می‌کنیم که نتایج حاصل نیز در جدول ۲ ذکر شده است. برای نوفه‌های ۵، ۷ و ۱۰٪ به‌ترتیب مقادیر احتمال پذیرش به‌صورت ۰/۹۸، ۰/۹۷ و ۰/۹۴ به‌دست آمده است که با مقایسه این مقادیر با بزرگی پارامتر احتمال نپذیرفتن (برابر با ۰/۰۵)، چنین برداشت می‌شود که نتایج دقت مطلوبی دارد. به‌منظور کسب اطمینان ازتطابق این نتایج با مقادیر اولیه، نتایج حاصل از داده آغشته با نوفه‌های ۵، ۷، و ۱۰٪ را برای نمونه با مقادیر واقعی به‌طور طرحوار مقایسه می‌کنیم که شکل ۵ گواه توافق و تشابه زیاد این نتایج است.

۲-۱-۲ مدل دو چشمه

برای آزمایش دقیق‌تر صحت روش پیشنهادی، علاوه بر اِعمال روش بر داده‌های مصنوعی تک‌چشمه‌ای کره و استوانه قائم، داده‌های مصنوعی بی‌هنجاری حاصل از دو چشمه استوانه قائم– استوانه قائم را در نظر می‌گیریم و برای تفسیر آن از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده سازگار استفاده می‌کنیم. مشخصات چشمه‌های ایجادکننده بی‌هنجاری، بی‌هنجاری بازماند حاصل از این دو مدل و نیز منحنی گرانی بازماند و منطقه‌ای به‌ترتیب در جدول ۳، شکل ۶، و شکل ۷ داده شده است.

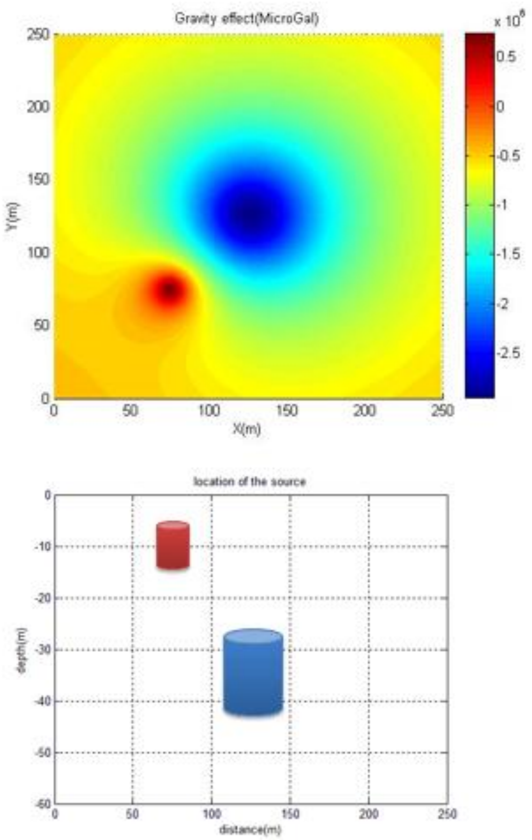
ابتدا این الگوریتم را بر بی‌هنجاری ترکیبی (بازماند و منطقه‌ای) بدون نوفه اِعمال می‌کنیم که نتایج تفسیری در جدول ۳ ذکر شده است. شکل ۷ منحنی مقایسه‌ای از بی‌هنجاری واقعی و بی‌هنجاری حاصل از تفسیر با الگوریتم مورد بحث را نشان می‌دهد. با توجه به این منحنی، به‌وضوح به تطابق قابل‌قبول نتایج حاصل از تفسیر بی‌هنجاری ترکیبی بدون نوفه با استفاده از الگوریتم پیش گفته می‌رسیم. حال ازآنجاکه در عمل، عوامل گوناگونی موجب نوفه‌دار شدن داده‌های برداشت شده می‌شود، بی‌هنجاری مدل ۳ را به نوفه‌های ۵، ۷ و ۱۰٪ آغشته می کنیم و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده سازگار برای تفسیر آن را به کار می‌بریم. نتایج این تفسیر نیز درجدول ۳ و منحنی‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. برای نوفه‌های ۵، ۷ و ۱۰٪ به‌ترتیب مقادیر ۰/۸۹، ۰/۸۶ و ۰/۸۲ برای پارامتر احتمال پذیرش به‌دست آمده است که با مقایسه این مقادیر با بزرگی پارامتر احتمال نپذیرفتن (برابر با ۰/۰۶)، این نکته بدیهی است که نتایج دقت مطلوبی دارند. با توجه به مقادیر موجود در جدول ۳ و نیز منحنی‌های نشان داده شده، به کارایی روش در تفکیک این دو بی‌هنجاری و برآورد مناسب پارامترهای مجهول بی‌هنجاری می‌رسیم. برای کسب اطمینان این الگوریتم را بر دو مدل دیگر نیز اِعمال خواهیم کرد.



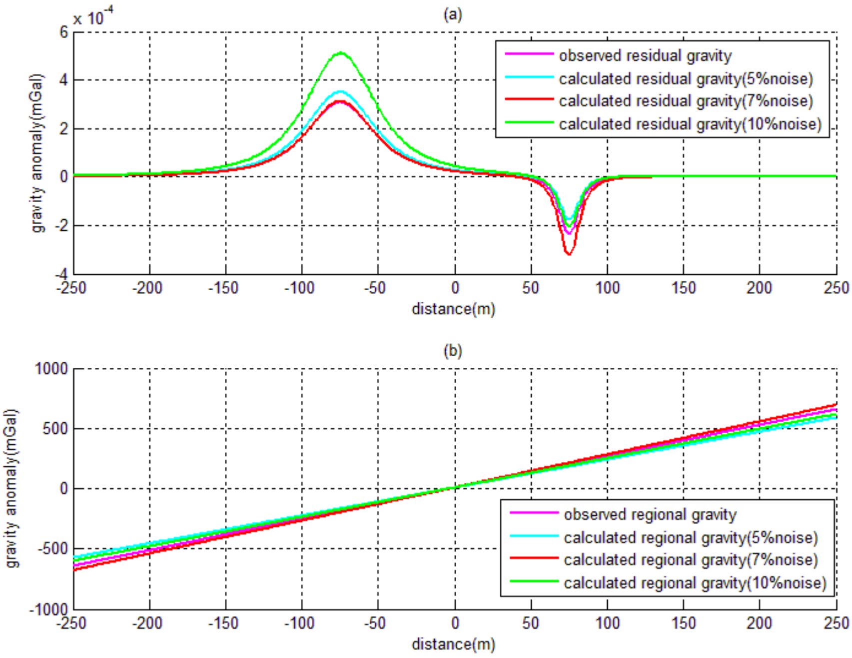
شکل ۵ . نمایشی طرحوار ازمقایسه منحنی‌های بی‌هنجاری ترکیبی ارزیابی شده و اولیه مدل دو استوانه قائم.

جدول ۳. مشخصات و نتایج تفسیری مدل استوانه قائم–استوانه قائم.

	(الف) مشخصات استوانه قائم اول						(ب) مشخصات استوانه قائم دوم					
پارامترهای گرانی	مقادیر اولیه	مقادیر ارزیابی شده بدون نوفه	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۵٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۷٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۰٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۵٪	مقادیر اولیه	مقادیر ارزیابی شده بدون نوفه	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۵٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۷٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۰٪	مقادیر ارزیابی شده با نوفه ۱۵٪
a	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰٤۰	۰/۰۰٤۳	۰/۰۰٤٥	−۰/۳۷٦۰	−۰/۳۷٦۳	−۰/۳۷٦۲	−۰/۳۷٦٥	−۰/۳۷٦۹	−۰/۳۷۷٥
z	۱۰	۱۰/۰۲۱۳	۹/۸۸۲۷	۹/۹٥۰۱	۹/۹٦۹۷	۱۰/۰٦۱٥	۳٥	۳٥/۰٤۳٦	۳٤/۹۷٦۱	۳٥/۰٤۰٥	۳٥/۰۹۲۷	۳٥/۱۰۷۰
q	۰/٥۰	۰/٥۰۸٦	۰/٤۸۲۳	۰/٥۳۰۹	۰/٤۷۹۷	۰/٦۱۲۹	۰/٥	۰/٥۰۱۰	۰/٤۸۸۳	۰/٤۷۸۳	۰/٤۷۰٥	۰/٤٦٦۱
x_0	۷٥/۰	۷٥/۰۳۳۳	۷٤/۹۹۱۷	۷٥/۰۲٤۰	۷٥/۲۹٥۱	۷٥/۰۰۷۰	۱۲٥/۰	۱۲٥/۱۰۰٦	۱۲٤/۹۹٦۹	۱۲٤/۹۷٤۸	۱۲٤/۹٦۱۲	۱۲٤/۹٦۸۷
$k1$	−۰/۰۱	−۰/۰۹۸٤	−۰/۰۹۸۱	−۰/۱۰۰۱	−۰/۱۰۰۸	−۰/۱۰۱۲	−۲/۲	−۲/۲۱۹٤	−۲/۳٤۲٥	−۲/۳۳٥۷	−۲/۳۳۲۰	−۲/۳٤٤۰
$k2$	۳/۰	۲/۹٦۷٥	۳/۰٥۳۳	۲/۹۳۳۲	۳/۰۲۰٥	۲/۹۰٦۱	٤/۰۰	٤/۰۰۳	٤/۰۰۷۷	٤/۰۸۱	٤/۰۹۸۰	۳/۱۸۷٦



شکل٦. بی‌هنجاری گرانی حاصل از دو چشمه استوانه قائم. بی‌هنجاری گرانی و نمایشی طرحوار از مقطع ارزی دو چشمه مدل دو استوانه قائم.



شکل۷. نمایشی طرحوار ازمقایسه منحنی‌های بی‌هنجاری ترکیبی ارزیابی شده و اولیه مدل دو استوانه قائم.

۲-۲ داده‌های واقعی

بعد از اِعمال روش پیشنهادی بر داده‌های مصنوعی و ارزیابی دقت نتایج حاصل، از این روش برای برآورد پارامترهای موردنیاز در اکتشاف کانسار طبیعی باریت در منطقه آباده – قدیمی‌ترین واحد تشکیلات با جنس سیلت استون، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آذرین مربوط به دوران ژوراسیک که با یک روراندگی در کنار تشکیلات سنگ آهکی کرتاسه قرار دارد- مورد استفاده قرار گرفته است. بیرون‌زدگی‌های کانسار باریت عمدتاً در سنگ‌آهک بلورین مربوط به دوران سوم دیده شده است که با یک روراندگی در کنار واحدهای با سن ژوراسیک قرار گرفته است.

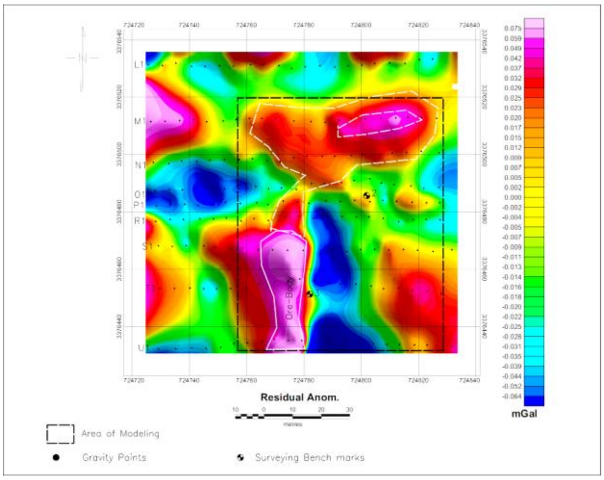
داده‌های مورد استفاده در این بخش، مربوط به عملیات اکتشاف سنگ معدن باریت درمنطقه آباده، واقع در استان فارس است. نقطه مبنای محدوده مورد بررسی در دستگاه مختصات UTM با x=724695.7 و y=3376527.3 مشخص می‌شود. در تحقیقات گرانی‌سنجی منطقه موردنظر، از دستگاه گرانی‌سنج سینترکس، مدل $CG3$ ، با دقت ۱۰ میکروگال استفاده شده است. برداشت داده، در شبکه‌ای شامل ۲۰۰ نقطه برداشت و فواصل ایستگاهی ۵ تا ۱۰ متر صورت گرفته است.

مقادیر حاصل از اِعمال روش فوق بر بی‌هنجاری گرانی مانده (نقشه بی‌هنجاری مانده مطابق شکل ۸) به شرح جدول ۴ است که با توجه به مقدار برآوردی ۱/۰۵۷۸ برای فاکتور شکل هندسی آن، استوانه افقی بهترین مدل برای شبیه‌سازی این بی‌هنجاری است. برای بررسی دقت نتیجه حاصل از اِعمال این روش بر داده‌های منطقه آباده، از نتایج تفسیری حاصل از روش اویلر برای برآورد بیشینه عمق منطقه بهره گرفتیم. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بیشینه عمق تفسیری برای منطقه مورد بررسی با استفاده از روش اویلر بین ۴ تا ۶ متر به‌دست آمده است که با توجه به قرارگیری مقدار کمّی عمق حاصل از روش

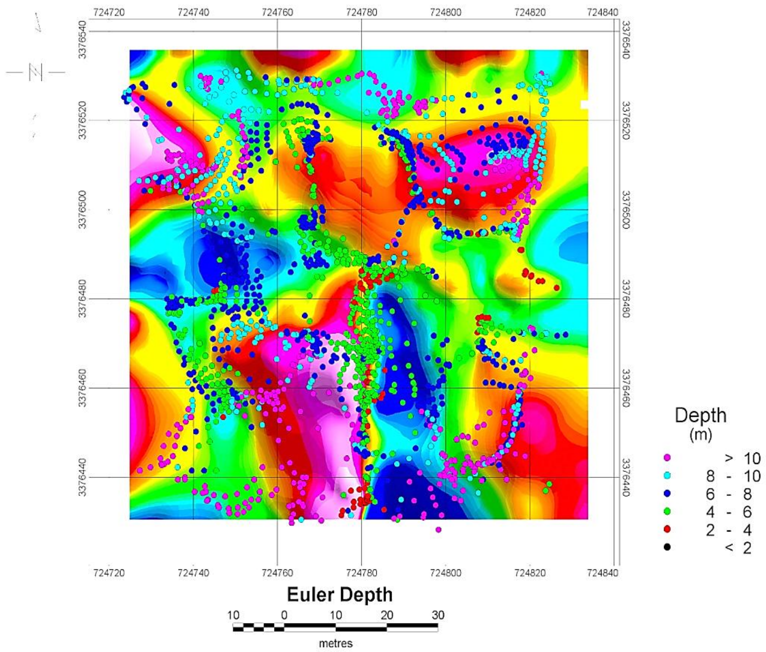
پیش رو (برابر با ۴/۵۹۴۶) در بازه مورد قبول برای این مورد بحث پی برد.
کمیت، می‌توان به دقت نسبی جواب حاصل از روش

جدول ٤. نتایج حاصل از اِعمال روش فوق بر داده‌های میکروگرانی‌سنجی سایت آباده.

پارامترهای فیزیکی	ضریب دامنه	فاکتورشکل	عمق	خطای RMS
مقادیر محاسبه شده	2/9348 میلی‌گال*مترمربع	0578/1	5946/4 متر	2833/0 میلی‌گال



شکل۸. نقشه بی‌هنجاری مانده سایت آباده (رسم در محیط نرم‌افزار ژئوسافت).



شکل۹. نقشه اویلر بی‌هنجاری مانده سایت آباده (رسم در محیط نرم‌افزار ژئوسافت).

۳ نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای برآورد پارامترهای ساختار مدفون با شکل‌های هندسی ساده با استفاده از مقادیر بی‌هنجاری گرانی مشاهده‌ای (ترکیبی از بی‌هنجاری منطقه‌ای و مانده) بر پایه مدل‌سازی غیرخطی مقید بیان شد. همان‌طور که نتایج حاصل از اِعمال این روش بر دادهای مصنوعی (حتی با احتساب نوفه ۱۰٪) و نیز داده‌های واقعی برداشت شده از سایت آباده نشان می‌دهد، این روش به‌خوبی مقادیر مفروض اولیه را به مقدار واقعی پارامتر باز می‌گرداند، که این امر در اکتشافات ژئوفیزیکی مطلوب است. البته اشاره به این نکته خالی از فایده نیست که این روش در مورد داده‌های منطقه آباده به دلیل نبود دسترسی به داده‌های خام، بر بی‌هنجاری مانده که اثرات منطقه‌ای از آن حذف شده، اِعمال شده است و می‌توان در تحقیقات بعدی از این روش برای تفسیر داده‌های خام استفاده کرد. نکته قابل‌توجه دیگر اینکه به علت قابلیت زیاد این الگوریتم در بازگردانی داده‌ها، انتخاب مقادیر اولیه درحکم پارامترهای کنترل‌کننده الگوریتم، تعریف شدهٔ کاربر، تاثیر زیادی بر عملکرد الگوریتم نخواهد داشت (با توجه به بررسی مدل‌های مصنوعی متفاوت با حداکثر نوفه ۱۰٪). با وجود نکات مثبت روش مطرح شده توجه به این نکته ضروری است، همان‌طور که در داده‌های مصنوعی مشاهده شد، در مورد داده‌های عمیق و طبیعتاً با درصد نوفه بزرگ‌تر، داده‌های اولیه مفروض باید اختلاف بسیار اندکی با مقادیر واقعی داشته باشند (آشنایی دقیق با ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی ضروری است). در غیر این صورت برگردان حاصل، دقت کافی نخواهد داشت و برای پژوهش‌های میکروگرانی‌سنجی نتایج مطلوب را به‌دست نخواهد داد. برای رفع این مشکل باید تأمل بیشتری روی شرط‌های توقف تکرار در حلقه‌های الگوریتم صورت گیرد. با توجه به اینکه این روش در تفکیک بی‌هنجاری‌های چندگانه مورد بررسی در مدل‌های مصنوعی و نیز برآورد پارامترهای ژئوفیزیکی آنها موفق بوده است، می‌توان از آن برای داده‌های واقعی و نیز طرح‌های اکتشافی که در آنها چند نمونه چشمه با فاصله وجود دارد نیز استفاده کرد. البته در این مقاله به بررسی مدل مصنوعی اکتفا شد.

منابع

Abdelrahman, E.M. and Sharafeldin, S.M. 1995a, A least-squares minimization approach to depth determination from numerical horizontal gravity gradients: Geophysics, 60, 1259–1260.

Abdelrahman, E.M. and Shrafaeldin, S.M. 1995b, A least-squares minimization approach to shape determination from gravity data: Geophysics, 60, 589–590.

Abdelrahman, E.M., Bayoumi, A.I. and El Araby, H.M. 1991, A least-squares minimization approach to invert gravity data: Geophysics 56, 115–118.

Abdelrahman, E.M., El-Araby, T.M., El-Araby, H.M. and Abo-Ezz, E.R. 2001a, Three least squares minimization approaches to depth, shape, and amplitude coefficient determination from gravity data: Geophysics 66, 1105–1109.

Abdelrahman, E.M., El-Araby, T.M., El-Araby, H.M. and Abo-Ezz, E.R. 2001b, A new method for shape and depth determinations from gravity data: Geophysics, 66, 1774–1780.

Asfahani, J. and Tlas, M. 2004, Nonlinearly constrained optimization theory to interpret magnetic anomalies due to vertical faults and thin dikes: Pure Appl. Geophys, 161, 203–219.

Gupta, O.P. 1983, A least-squares approach to depth determination from gravity data: Geophysics, 48, 375–360.

Ingber, L. 1993a, Adaptive Simulated Annealing (ASA). Global optimization C-code: Caltech Alumni Association.

Ingber, L. 1993b, Simulated annealing: Practice versus theory: Mathematical Computer Modelling, 18(11), 29–57.

Ingber , L. 1996, Adaptive Simulated Annealing (ASA): Lessons learned: J. Control and Cybernetics, 25, 33–54.

Nettleton, L. L., 1976, Gravity and Magnetic in Oil Prospecting: MacGraw-Hill Book Co.

Nettleton , L.L. 1962, Gravity and magnetics for geologists and seismologists: AAPG 46, 1815–1838.

Oregard, M.E. and Berg, J. W. 1965, Gravity interpretation using the Fourier integral: Geophys., 30, 424–438.

Shaw, R.K. and Agrawal, S.N.P. 1990, The application of Walsh transform to interpret gravity anomalies due to some simple geometrically shaped ceased sources: A feasibility study: Geophys., 55, 843–850.

Ingber , L. 2011, Adaptive Simulated Annealing (ASA): Lessons Learned, J. Control and Cybernetics 25, 33–54.

Johnson, D. C., Aragon, C. R., McGeoch, L.A., Schevon, C., 1987 Optimization by simulated annealing. An experimental evolution (Parts 1 & 2): Report AT& T Bell laboratories.

Kirkpatrick. A.C, Gelatt C.D., and Vecchi M.P., 1983, Optimization by simulated annealing: Science, 220 (4598), 671-680.

Mohan, N.L., Anandababu, L. and Roa, S. 1986, Gravity interpretation using the Melin transform: Geophys., 51, 114–122.