

مدل‌سازی دو بُعدی داده‌های گرانی با استفاده از روش معکوس‌سازی فشرده و معیار توقف تغییر چگالی

میثم عابدی^۱، احمد افشار^۱، وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^{۲*} و غلامحسین نوروزی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن-اکتشاف، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۲دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۷، دسترسی برخط: ۱۳۸۹/۱۲/۲۵)

چکیده

اکثر روش‌های مدل‌سازی دارای محدودیت‌اند و این محدودیت برای مدل‌سازی داده‌های پتانسیل نیز وجود دارد. به دلیل پیچیدگی روش‌های مدل‌سازی نهشته‌های با شکل نامشخص، معمولاً سعی می‌شود که این ساختارهای زیرزمینی با شکل‌های ساده شده‌ای شبیه‌سازی شوند. با استفاده از این شبیه‌سازی صورت گرفته، می‌توان پارامترهایی مثل عمق و محدوده نهشته‌ها را برآورد کرد. اما نکته این است که شکل واقعی نهشته می‌تواند کاملاً متفاوت از شکل ساده شبیه‌سازی شده باشد. بنابراین برای رفع این محدودیت، سطح زیر زمین را با استفاده از منشورهای دو بُعدی چهارگوش تقسیم‌بندی و روش‌های مدل‌سازی را پیاده می‌کنند. در این مقاله با فرض ساختار نامشخص هندسی برای نهشته، از روش اصلاح شده مدل‌سازی معکوس فشرده برای داده‌های گرانی‌سنجی استفاده شده است. این روش حجم نهشته ایجاد کننده بی‌هنجاری را حداقل می‌کند که این امر معادل بیشینه کردن فشرده‌گی نهشته است. در اینجا برای به دست آوردن تعداد تکرار مناسب برای همگرایی مدل، از معیار توقف جدید تغییر چگالی استفاده شده است. این روش روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار آزمایش شد؛ سپس روی داده‌های واقعی یعنی زغال‌های بیتومینه دهلران به کار رفت. نتیجه نهایی حاکی از لایه‌ای از زغال با عمق بالایی ۱۰ متر است که تا عمق ۳۵ متر گسترش دارد. نتایج حفاری نشان از لایه‌ای از زغال با عمق بالایی حدود ۷ تا ۱۰ متر است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی معکوس فشرده، مدل‌های مصنوعی، داده‌های گرانی‌سنجی، زغال بیتومینه دهلران

2D modeling of gravity data with the compact inversion method and density variation as a stopping criterion

Maysam Abedi¹, Ahmad Afshar¹, Vahid Ebrahimzade Ardestani^{2*}, and Gholam Hossain Norouzi¹

¹Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 16 April 2009, accepted: 28 December 2010, available online: 16 March 2011)

Summary

Potential field data (gravity and magnetic data) are usually analyzed by means of linear transformations, spectral methods, inversion techniques and analytic signal methods. Nowadays, there are diverse methods of modeling the gravity data, but each has some

*Corresponding author:

ebrahimz@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

limitations. One of the limitations of these methods is the assumption of a simple shape for buried structures, whereas the actual shape could be entirely different. The present study uses two-dimensional 4-sided polygons (prisms) to resolve these limitations, because with these it is possible to make any shape for an unknown underground structure by arranging these prisms.

Within the context of this study, the 2D inversion method proposed by Last and Kubik (1983) is reused. For this purpose, a Matlab-based 2D inversion code was developed. This code uses an iterative least squares procedure, which allows the weights to depend on the densities of the previous iteration. Therefore, the solution minimizes both the area of the underground structures or deposits and the weighted sum of squared residuals.

According to Last and Kubik, the iterative procedure stops when a minimum area of the density distribution is reached. The stopping criteria in inversion algorithms are usually based on the fit between the observed data and theoretical data produced by the proposed model. Typically, a misfit function estimator is used.

In the inversion of potential field data, the number of observations is often less than the number of unknowns (underdetermined problem). To overcome this problem, this study uses a new method proposed by Ekinci, wherein the density variation is used as a new stopping criterion to find the required number of iterations for convergence the model. The focusing inversion method proposed by Last and Kubik was modified in order to produce a compact final model. For this model, the difference between the block densities at the last successive iteration is minimal. This method minimizes the volume of deposit, which is equivalent to maximizing its compactness. Here, the method for noise-free and noise-corruption synthetic data was used and after obtaining satisfactory results it was applied to real data.

The Dehloran Bitumen map in Iran is chosen as a real data application. The area under consideration is located in the Zagros tectonic zone, in western Iran, where a search for Bitumen is under way. Layers of medium bedded limestone with intermediate marl-limestone are the dominant formations in the area, and the hydrocarbon zone is one of the most important characteristics of the area.

By using the method for noise-free and noise-corruption synthetic data, the present study produced a program for the Dehloran Bitumen map. Anomaly modeling was used because the anomaly value of the cross section, which is taken from the gravity anomaly map of Dehloran Bitumen, is very close to those obtained from this method.

The final result of these methods shows that the deposit starts from the depth of 10 meters to about 35 meters. This modeling was a satisfactory representation of the results of actual drilling in the region. The results of the drillings show that the lowest depth of the deposit varies from 7 to 10 meters. This 2D modeling of gravity data with the compact inversion method and density variation can easily be applied for gravity, microgravity and magnetic data.

Key words: Compact inversion modeling, synthetic models, gravity data, Dehloran bitumen

۱ مقدمه

در مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی، مهم‌ترین پارامترهایی که در کارهای اکتشافی مورد توجه قرار دارد، عمق و محدوده کانی‌سازی است. امروزه روش‌های گوناگونی مانند روش اویلر، حداقل مربعات، روش

داده‌های پتانسیل (گرانی و مغناطیس) را، معمولاً با استفاده از تبدیل‌های خطی، روش‌های طیفی، روش‌های معکوس و سیگنال‌تحلیلی پردازش می‌کنند (اکینسی، ۲۰۰۸)؛ ولی

می‌دهد تا چگالی متغیر داشته باشد. این مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. برای چنین مدلی، گرانی نقطه اُم از داده‌های مشاهده شده برابر است با (لاست و کوییک، ۱۹۸۳):

$$g_i = \sum_{j=1}^M a_{ij} v_j + e_i, \quad i = 1 \dots N, \quad (1)$$

که در آن v_j چگالی بلوک اُم و e_i نوفه در داده اُم و a_{ij} ماتریس کرنل داده‌ها است. برای a_{ij} می‌توان گفت (لاست و کوییک، ۱۹۸۳):

$$\begin{aligned} a_{ij} &= 2\gamma[(x_i - x_j + d/2) \log(r_2 r_3 / r_1 r_4) \\ &+ d \log(r_4 / r_3) \\ &- (z_j + h/2)(\theta_4 - \theta_2) \\ &+ (z_j - h/2)(\theta_3 - \theta_1)], \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} r_1^2 &= (z_j - h/2)^2 + (x_i - x_j + d/2)^2, \\ r_2^2 &= (z_j + h/2)^2 + (x_i - x_j + d/2)^2, \\ r_3^2 &= (z_j - h/2)^2 + (x_i - x_j - d/2)^2, \\ r_4^2 &= (z_j + h/2)^2 + (x_i - x_j - d/2)^2, \\ \theta_1 &= \arctan(x_i - x_j + d/2)/(z_j - h/2), \\ \theta_2 &= \arctan(x_i - x_j + d/2)/(z_j + h/2), \\ \theta_3 &= \arctan(x_i - x_j - d/2)/(z_j - h/2), \\ \theta_4 &= \arctan(x_i - x_j - d/2)/(z_j + h/2). \end{aligned}$$

و γ ثابت جهانی جاذبه است.

در حالت کلی می‌توان اثر بلوک‌های تولیدکننده بی‌هنجاری گرانی را به صورت ضرب ماتریسی زیر نشان داد:

$$[G] = [A] \cdot [V], \quad (3)$$

که در آن G ، گرانی مشاهده شده، V ، توزیع چگالی بلوک‌ها و A ، ماتریس ژاکوبی (کرنل) است که طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود. شکل ۲ اثر ماتریس A را برای ۱۳ نقطه برداشت شده در طول یک نیم رخ، نشان می‌دهد که در آن سطح زیر زمین به ۵۲ بلوک (4×13) با طول

واهمامیخت (دی‌کانولوشن) ورنر و شبکه‌های عصبی برای چنین مدل‌سازی‌هایی وجود دارند (سالم و همکاران، ۲۰۰۴). به‌طورقطع معکوس کردن داده‌های پتانسیل غیریکتا است. این امر به دلیل وجود جواب‌های همگن در یک دستگاه معادلات به وجود می‌آید (نجاتی و اردستانی، ۱۳۸۴؛ نجاتی و همکاران، ۱۳۸۴). با توجه به نظریه گاوس، اگر میدانی روی سطحی شناخته شده باشد، منابع معادل و متفاوت بسیاری می‌تواند وجود داشته باشد که چنین میدانی را تولید کنند. یک راه برای حل چنین مشکلی، داشتن اطلاعاتی اولیه از منبع مورد نظر است (اکینسی، ۲۰۰۸).

امروزه روش‌های گوناگونی برای معکوس‌سازی وجود دارد که یکی از این روش‌ها را لاست و کوییک، برای مدل‌سازی دو بُعدی داده‌های گرانی‌سنجی پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله از این روش استفاده می‌شود. همان‌طور که می‌دانید در مسائل مربوط به معکوس‌سازی، معیار توقف فرایند مدل‌سازی، رسیدن به نقطه مشخصی از سطح خطا است. این خطا ناشی از حداقل مربعات خطا بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های مصنوعی تولید شده است. اما این معیار توقف، زمانی که میدان پتانسیل به خوبی شناخته نباشد در مسائل معکوس‌سازی جواب‌های رضایت‌بخشی حاصل نمی‌کند. بنابراین از معیاری جدید که اکینسی پیشنهاد کرده است، استفاده می‌شود. در این معیار، توقف، زمانی حاصل می‌شود که مربع تغییر چگالی بین دو تکرار متوالی حداقل باشد. این روش اخیراً برای داده‌های مغناطیسی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (استوک و همکاران، ۲۰۰۹).

۲ مدل به کار گرفته شده

مدل انتخابی در اینجا، یکی از معروف‌ترین مدل‌هایی است که لاست و کوییک برای مدل‌سازی داده‌های گرانی از آن استفاده کرده‌اند. این مدل آرایه‌ای از مستطیل‌ها است که با ثابت نگه‌داشتن هندسه به هر بلوک اجازه

مطابق با اختلاف چگالی ساختار زیرسطحی و زمینه شده باشند.

در این روش با استفاده از تابع زیر چگالی بلوک‌ها حداقل می‌شود:

$$q = \sum_{j=1}^M W_{vj} V_j^2 \rightarrow \text{minimum}, \quad (4)$$

که تابع وزنی چگالی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_{vj} = (V_j^2 + \beta)^{-1}, \quad (5)$$

که در آن β عددی کوچک است. حال با استفاده از تابع وزنی بالا و مدل‌سازی فشرده می‌توان چگالی بلوک‌ها را برآورد کرد، که این از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = W_V^{-1} A^T (A W_V^{-1} A^T)^{-1} G, \quad (6)$$

در روش مدل‌سازی فشرده، تابع وزنی از نتایج تکرار قبلی و چگالی برآورد شده، برای اصلاح وزن‌های جدید استفاده می‌کند تا اینکه مدل همگرا شود. در حالت کلی در تکرار m ام، روابط بالا به صورت زیر هستند:

$$[W_V^{m-1}]_{jj} = ([V_j^{m-1}]^2 + \beta)^{-1}, \quad (7)$$

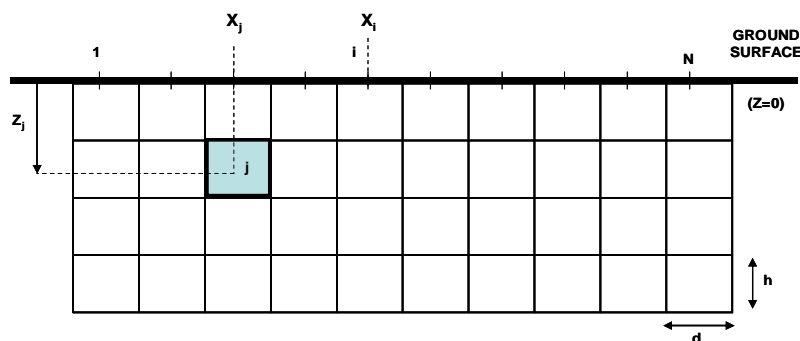
$$V^{(m)} \quad (8)$$

$$= [(W_V^{m-1})^{-1} A^T (A (W_V^{m-1})^{-1} A^T)^{-1}] G,$$

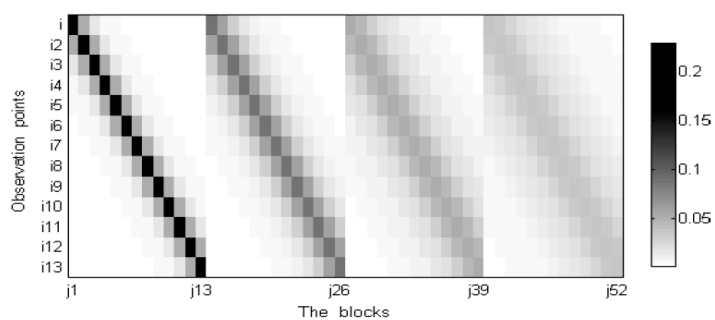
و عرض ۱۰ متر تقسیم شده است (شکل ۳). همان‌طور که در شکل ۲ می‌بینیم، اثر این ماتریس برای بلوک‌های سطحی بیشتر است و بیان‌کننده این حقیقت است که بلوک‌های نزدیک به سطح تأثیر به‌سزایی روی بی‌هنجاری‌های گرانی‌سنجی دارند. در این روش مدل‌سازی از آنجاکه داده مربوط به نقطه مرکزی بلوک‌ها در مدل‌سازی به کار می‌رود، اندازه بلوک‌ها باید تا حد امکان کوچک در نظر گرفته شود تا از پدیده آلیازینگ داده‌ها جلوگیری شود.

۳ روش معکوس‌سازی داده‌ها

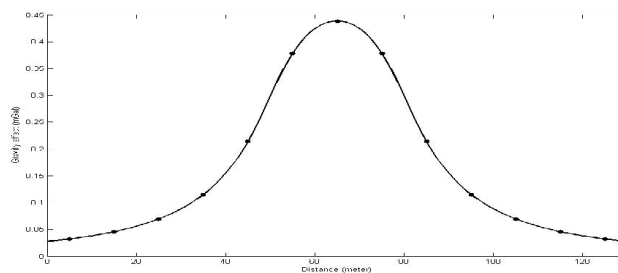
لاست و کویک، روش معکوس‌سازی فشرده را برای مدل‌سازی معکوس داده‌های گرانی‌سنجی پیشنهاد دادند که در آن ساختارهای ساده را می‌توان بدون در نظر گرفتن شکل خاصی برای نهشته، با استفاده از مدل بلوکی، مدل‌سازی کرد. در ابتدا، برنامه معکوس‌سازی به همه بلوک‌های زیرسطحی وزن می‌دهد؛ ولی در ادامه باید از وزن بعضی از آنها کاسته و بر وزن‌های دیگر بلوک‌ها افزوده شود تا به مدل واقعی برسد و زمانی این اتفاق می‌افتد و به مدل واقعی همگرا می‌شود که وزن بعضی از بلوک‌ها که بیانگر زمینه است، صفر شود و سایر وزن‌ها



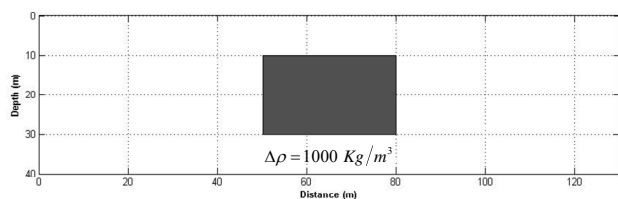
شکل ۱. مدل دو بُعدی، در شکل بالا نقطه A_m و بلوک j نشان داده شده است. d و h به ترتیب طول و عرض هستند (لاست و کویک، ۱۹۸۳).



شکل ۲. اثر ماتریس ژاکوبی برای ۱۳ نقطه برداشت در طول یک نیم‌رخ (سطح زیر زمین شامل ۵۲ بلوک (۱۳ × ۴) با طول و عرض ۱۰ متر). (اکینسی، ۲۰۰۸).



(الف)



(ب)

-24.24	-26.98	-23.84	13.38	171.2	466.1	585.9	466.1	171.2	13.38	-23.84	-26.98	-24.24
4.89	11.26	33.09	85.52	183.7	299.2	350.6	299.2	183.7	85.52	33.09	11.26	4.89
23.80	36.30	60.72	102.0	158.8	213.2	236.1	213.2	158.8	102.0	60.72	36.30	23.80
35.90	49.57	70.67	99.83	133.4	161.8	173.1	161.8	133.4	99.83	70.67	49.57	35.90

(ج)

0.2	0	0	0	11.9	29.2	2.4	29.2	11.9	0	0	0	0.2
0	0	0	0	79	947.6	1372	947.6	79	0	0	0	0
0	0	0.7	9.7	119.1	489.9	721.8	489.9	119.1	9.7	0.7	0	0
0	0.1	1.2	10	47.8	121	163.1	121	47.8	10	1.2	0.1	0

(د)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1000	1000	1000	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1000	1000	1000	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(ه)

شکل ۳. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهشته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱، (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۴ و (ه) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۸

۴ مدل‌سازی داده‌های مصنوعی

به منظور بیان کارایی روش، به طرح چهار مثال می‌پردازیم. در هر مثال، مدل‌های مصنوعی با بلوک‌های تیره و به همراه بی‌هنجاری ناشی از آن نشان داده شده است. در مثال اول یک نهشته با عمق ۱۰ متر و طول و عرض 20×30 مدل شده است که اختلاف چگالی آن 1000 kg/m^3 فرض شد. در این مدل‌سازی، سطح زیر زمین به ۵۲ بلوک (4×13) ، طبقه‌بندی شده است (شکل ۳). در طی فرایند معکوس‌سازی، در اولین تکرار، اختلاف چگالی بین همه بلوک‌ها پراکنده می‌شود و در تکرارهای بعدی از این مقادیر کاسته می‌شود تا اینکه به مدل فشرده شده واقعی با اختلاف چگالی موردنظر برسد. در طی این تکرارها، تابع عدم برازش عدد بسیار کوچکی است ولی هرگز همگرا نشده است (شکل ۴). بنابراین، این معیار برای توقف فرایند معکوس‌سازی مناسب نیست. درحالی‌که معیار توقف تغییر چگالی در تکرار هشتم همگرا شده و مقدار آن به حداقل رسیده است (شکل ۵). در نتیجه این معیار در فرایند معکوس‌سازی مناسب است. در شکل ۳ فرایند معکوس‌سازی در تکرارهای ۱، ۴ و ۸ نشان داده شده است.

در مثال دوم دو نهشته یکی با عمق ۱۰ متر و طول و عرض 20×10 و دیگری با طول و عرض 30×10 و به صورت رخنمون‌دار مدل شده است. اختلاف چگالی برای نهشته با عمق ۱۰ متر، 2000 kg/m^3 و برای نهشته دیگر 1000 kg/m^3 فرض شد. در این مدل‌سازی سطح زیر زمین به ۳۰ بلوک (3×10) ، طبقه‌بندی شده است (شکل ۶). مانند حالت قبل، تابع عدم برازش عددی بسیار کوچک است ولی هرگز همگرا نشده است (شکل ۷).

بنابراین این معیار برای توقف فرایند معکوس‌سازی مناسب نیست. درحالی‌که معیار توقف تغییر چگالی در تکرار یازدهم همگرا شده و مقدار آن به حداقل رسیده است (شکل ۸). بنابراین این معیار مانند مثال قبل در فرایند

این روش با توجه به راه‌حل حداقل مربعات، به تولید چگالی بلوک‌ها می‌انجامد و شروع به فشرده کردن حجم نهشته ایجاد کننده بی‌هنجاری می‌کند تا اینکه به چگالی موردنظر برسد. معیار توقف در روش‌های معکوس معمولاً برازش مناسب بین منحنی داده‌های واقعی (مشاهده شده) و منحنی داده‌های مصنوعی تولید شده (محاسبه شده) است. یکی از توابع رایج برای این کار یعنی تابع عدم برازش به صورت زیر است (اکینسی، ۲۰۰۸):

$$Misfit = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (g_i^{obs} - g_i^{cal})^2 \right)^{1/2}}{\left(\sum_{i=1}^N (g_i^{obs})^2 \right)^{1/2}}, \quad (9)$$

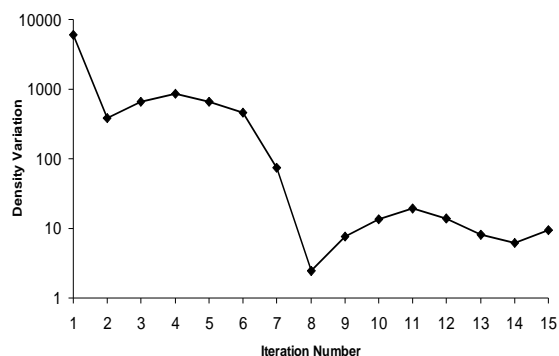
در معکوس‌سازی داده‌های پتانسیل، اغلب تعداد مشاهدات کمتر از پارامترهای مجهول است، که این یکی از مشکلات رایج در مسائل معکوس است (اکینسی، ۲۰۰۸). بنابراین در اینجا از معیاری اضافی برای توقف مسائل معکوس‌سازی استفاده می‌شود. این معیار براساس تغییر چگالی بین دو تکرار متوالی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود (اکینسی، ۲۰۰۸):

$$Density\ Variation = \left(\sum_{i=1}^N (V_i^k - V_i^{k-1})^2 \right)^{1/2}, \quad (10)$$

در این مقاله، این معیار به همراه تابع عدم برازش برای مدل‌سازی به کار گرفته می‌شود تا مدلی فشرده با بیشترین برازش با مدل واقعی به دست آید.

با توجه به برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار مطلب (Matlab)، می‌توان محیط زیر نیم‌رخ موردنظر را بلوک‌بندی کرد و با استفاده از این بلوک‌ها در واقع اثر ماتریس کرنل که در رابطه (۲) آورده شده است محاسبه می‌شود. از نکات مهم دیگر در این روش پیشنهادی، اندازه ابعاد بلوک‌ها است که هر چه کوچک‌تر باشد نتایج مناسب‌تری حاصل می‌شود. ولی زمان مدل‌سازی افزایش می‌یابد و نیاز به رایانه‌های با قابلیت پردازش بیشتر است.

مصنوعی فرض شد که دو تا از برداشت‌ها دارای نوفه‌اند. در اکثر روش‌های مدل‌سازی داده‌های گرانی معمولاً حداکثر میزان نوفه را تا ۱۰٪ در نظر می‌گیرند و در اینجا مقادیر دو داده به ترتیب در ۰/۹ و ۱/۰۵ مقادیر بی‌هنجاری داده واقعی ضرب می‌شود تا اثر نوفه را برای دو داده به میزان ۱۰ و ۵ درصد به ترتیب نشان دهد. اختلاف چگالی 1000 kg/m^3 فرض می‌شود. در این مدل‌سازی سطح زیر زمین به ۳۰ بلوک (3×10)، طبقه‌بندی شده است (شکل ۱۲). مانند حالات قبل، تابع عدم برازش عددی بسیار کوچک است و همگرا نشده است (شکل ۱۳)، در حالی که معیار توقف تغییر چگالی در تکرار یازدهم همگرا شده و مقدار این تابع حداقل است (شکل ۱۴). در شکل ۱۲ فرایند معکوس‌سازی در تکرارهای ۱، ۵ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در تکرار یازدهم می‌بینید، این مدل‌سازی به شکلی نزدیک به مدل واقعی همگرا شده است. معمولاً در اکثر مدل‌سازی داده‌های واقعی با چنین حالتی مواجه می‌شوید که حتی در آن شدت نوفه هم بیشتر است. مدل‌سازی برای چنین حالتی، حداقل یک دید کلی از نهشته را می‌دهد. در تمام حالت‌ها، $\beta = 10^{-8}$ در نظر گرفته شده است.

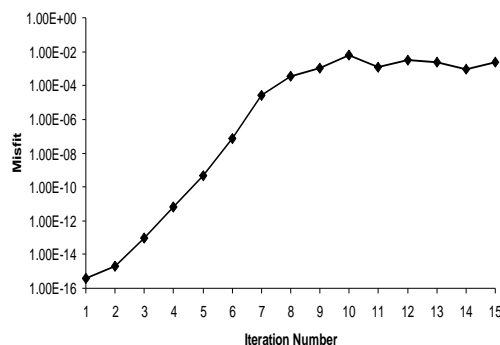


شکل ۵. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.

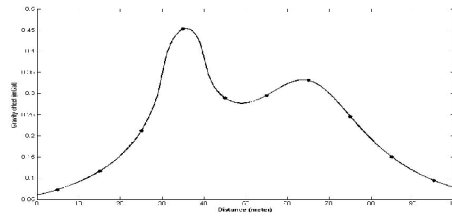
معکوس‌سازی مناسب است. در شکل ۶ فرایند معکوس‌سازی در تکرارهای ۱، ۵ و ۱۱ نشان داده شده است.

معمولاً در مسائل مربوط به گرانی، اختلاف چگالی بین نهشته موردنظر و زمینه کم است و احتمال شیب‌دار بودن نهشته نیز وجود دارد، بنابراین در سومین مثال یک نهشته شیب‌دار با اختلاف چگالی کم 200 kg/m^3 مدل می‌شود (شکل ۹). در این مدل‌سازی نیز سطح زیر زمین به ۳۰ بلوک (3×10)، طبقه‌بندی شده است. در اینجا نیز تابع عدم برازش عددی بسیار کوچک است و همگرا نشده است (شکل ۱۰)، این در حالی است که معیار توقف تغییر چگالی در تکرار یازدهم همگرا شده و مقدار آن به حداقل رسیده است (شکل ۱۱). در شکل ۹ فرایند معکوس‌سازی در تکرارهای ۱، ۷ و ۱۱ نشان داده شده است.

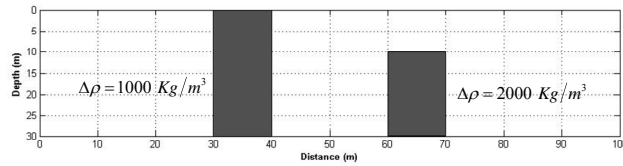
از آنجاکه در برداشت‌های گرانی‌سنجی معمولاً در داده‌ها نوفه وجود دارد؛ در مثال چهارم یک نهشته بدون عمق با طول و عرض 20×20 مدل شد که در آن دو داده با مقدار نوفه ۵ و ۱۰ درصد وجود دارد. معمولاً داده‌های بعضی از برداشت‌ها دارای نوفه است که می‌تواند ناشی از خطای دستگاهی و یا انسانی باشد و در این داده



شکل ۴. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.



(الف)



(ب)

-27.2	-26.4	51.7	1184	135	300.4	582.9	302.1	68.2	17.9
44.2	93.6	242.2	424	340.2	308.7	326.1	246.9	140	76.5
81.7	130.4	206.9	271.4	277.6	264	245.7	202.6	146.4	100.2

(ج)

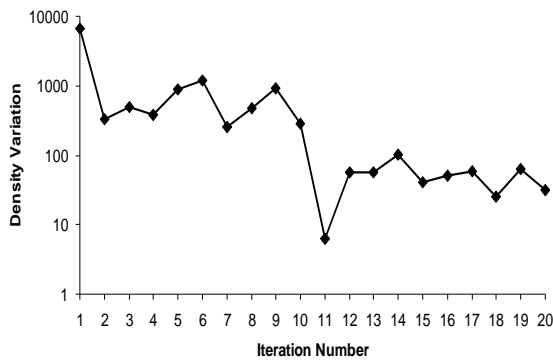
2.9	0	0	995.8	0	95.5	215.7	99.9	-0.2	0
0	0	-2.4	1035	117.1	193.1	1569	188.9	178.2	26.3
0	5.5	169.2	721.3	358	235.2	325.9	258.4	77.7	1.7

(د)

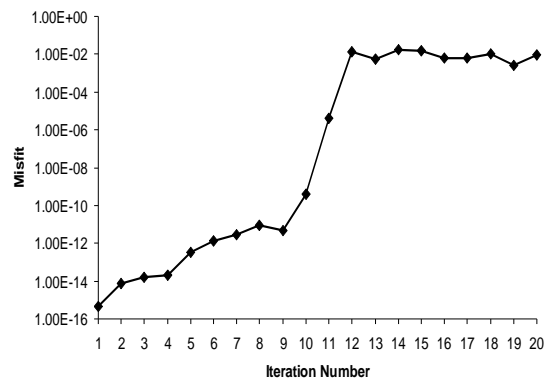
0	0	0	1000	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1000	0	0	2000	0	0	0
0	0	0	1000	0	0	2000	0	0	0

(ه)

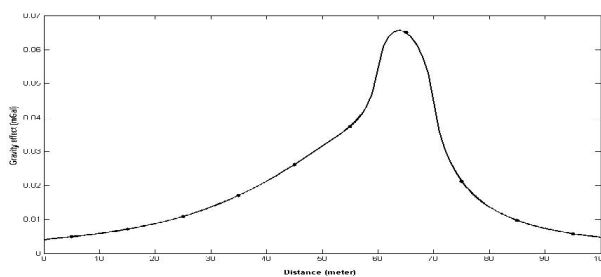
شکل ۶. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهشته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱، (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۵ و (ه) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱۱.



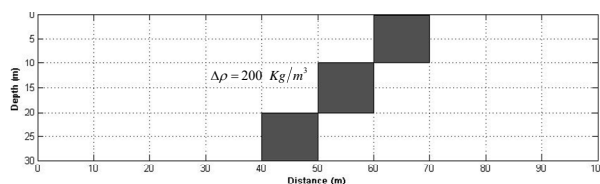
شکل ۸. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.



شکل ۷. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.



(الف)



(ب)

-1.211	-1.003	1.504	8.876	25.05	34.86	198.2	-17.09	-12.57	-8.300
2.387	4.007	7.804	15.04	26.65	46.72	62.40	28.78	6.441	1.663
4.732	6.899	10.59	16.28	24.04	32.42	34.42	24.65	13.41	7.302

(ج)

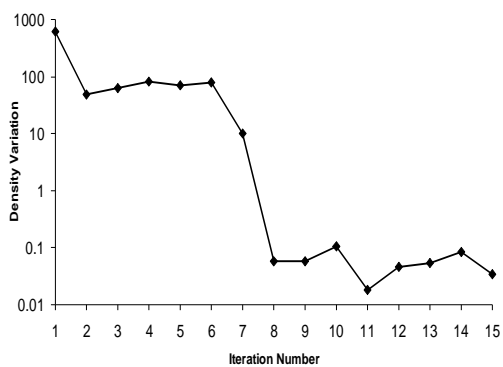
0	0	0	0	0	0.001	200.0	0	0	0
0	0	0	-0.000	0.011	200.0	0	0	0	0
0	0	0	0.014	199.9	0.022	-0.000	0	0	0

(د)

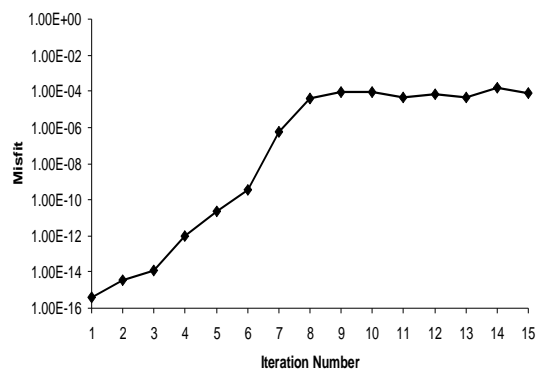
0	0	0	0	0	0	200	0	0	0
0	0	0	0	0	200	0	0	0	0
0	0	0	0	200	0	0	0	0	0

(ه)

شکل ۹. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهشته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱، (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۷ و (ه) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱۱.



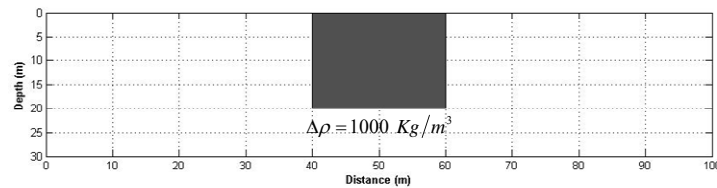
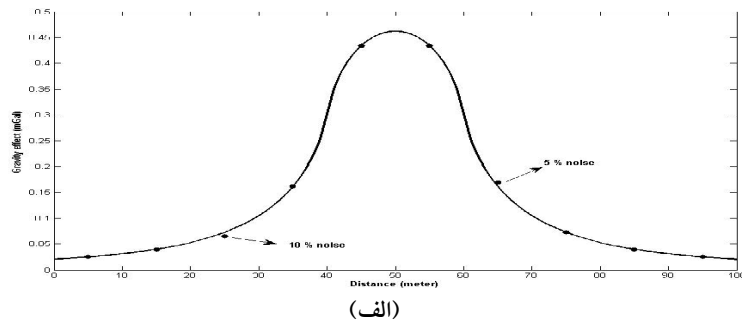
شکل ۱۱. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.



شکل ۱۰. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.

و بعضی از ساختارها نیز دارای چگالی کمتری باشند احتمال می‌رود. بنابراین از مزیت‌های این روش این است که می‌تواند چگالی ساختارهای مجزا حتی بیشتر و کمتر نسبت به زمینه را مدل کند. در نتیجه بعضی از وزن‌ها ممکن است مثبت باشند و ساختار با چگالی بیشتر نسبت به زمینه را نشان دهند و برعکس.

در پیاده‌سازی مدل برای داده‌های واقعی، محیط مورد بررسی ممکن است کاملاً با شکل‌های ساده هندسی متفاوت باشد و حتی امکان به وجود آمدن دو یا چند ساختار با چگالی‌ای که نسبت به زمینه بیشتر و یا کم‌ترند وجود دارد؛ بنابراین وجود دو یا چند ساختار مجزا که در آن بعضی از ساختارها دارای چگالی بیشتر نسبت به زمینه



(ب)

-47.8	-55.3	-124.5	-58	1064	1054	-30.8	-102.6	-66	-50.1
-2.5	2.7	40.4	199	464	466.2	207.9	48.5	4	-3.2
26.8	47	94.4	181.3	269	270.4	185.2	98.3	49	27.4

(ج)

-5.2	0	-46.6	-0.2	998.3	937.6	0	-23.9	-8.8	-6.5
0	0	0	40.3	770.4	1251	-0.4	0	0	0
0	0	0	14.2	120.4	0	0	0	0	0

(د)

-5.6	0	-44.7	0	987.7	935.6	0	-24.9	-9.7	-7.2
0	0	0	0	827.8	1215	0	0	0	0
0	0	0	0	171.9	0	0	0	0	0

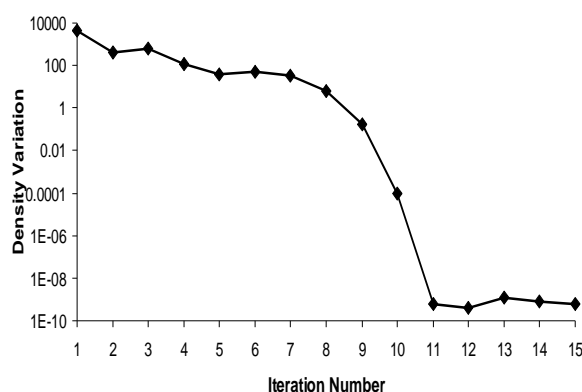
(ه)

شکل ۱۲. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهشته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱، (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۵ و (ه) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱۱.

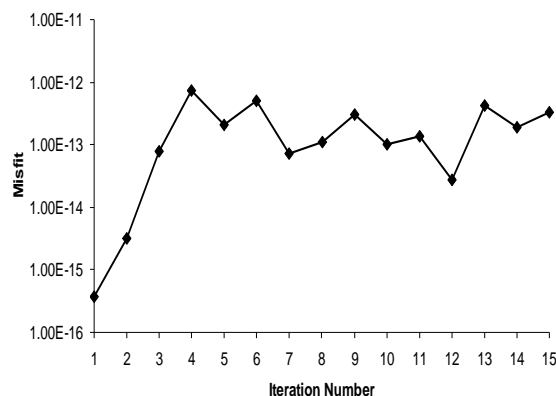
۵ محدودیت روش معکوس سازی فشرده

معمولاً اکثر روش های مدل سازی دارای محدودیت اند که این موضوع در به کارگیری روش معکوس سازی فشرده نیز صدق می کند. با آزمایش این روش روی ساختارهای متفاوت، دو نتیجه مهم به دست آمد؛ اول اینکه برای نهشته هایی که در آن نسبت طول نیم رخ به عرض بالایی نهشته کم باشد و یا به عبارتی منحنی بی هنجاری گرانی پهن باشد، نتایج حاکی از واگرایی مدل است. به این منظور در شکل ۱۵، یک نهشته با رخنمونی به طول ۶۰ متر مدل شده است که اختلاف چگالی آن با زمینه 500 kg/m^3 است. در این مدل سازی، سطح زیر زمین به ۴۰ بلوک (4×10) ، طبقه بندی شده است. با توجه به معیارهای توقف تابع عدم برازش و تغییر چگالی (شکل های ۱۶ و ۱۷)، مدل سازی در تکرار یازدهم همگرا می شود. ولی همان گونه که می بینید مدل نهایی حاصل شده با مدل واقعی کاملاً متفاوت است (شکل ۱۵-د). برای رفع این مشکل روشی پیشنهاد می شود که این محدودیت را تا حدودی کم رنگ تر می کند. در صورت روبرو شدن با چنین مشکلی، نتایج مدل سازی در تکرار اول (شکل ۱۵-ج) می تواند تا حدودی کمک کننده باشد. در این حالت، بلوک هایی که چگالی آنها در هر

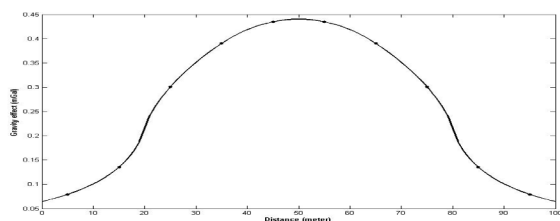
ردیف نسبتاً بیشتر باشد، به منزله محدودده ای با احتمال زیاد انتخاب می شود و به همین ترتیب محدودده با احتمال کمتر نیز مشخص می شود (شکل ۱۸). معمولاً در مدل سازی داده های واقعی تعداد بلوک های زیرسطحی بسیار زیاد است و برای انتخاب محدودده ای با احتمال زیاد، از روش دستی استفاده نمی شود. برای حل این مشکل، اختلاف چگالی برآورد شده برای هر بلوک را به مختصات مرکز بلوک نسبت می دهند و سپس بعد از اعمال آن برای همه بلوک ها، خروجی حاصل را کنتور می کند که با استفاده از آن می توان محدودده های با احتمال زیادتر را حدس زد. دومین مشکل در به کارگیری این روش برای نهشته های عمیق آشکار می شود. به این منظور در شکل ۱۹، نهشته ای با عمق ۳۰ متر، طول و عرض 30×20 و اختلاف چگالی 500 kg/m^3 مدل می شود. در اینجا سطح زیر زمین به ۷۰ بلوک (7×10) ، طبقه بندی شده است. با توجه به معیارهای توقف تابع عدم برازش و تغییر چگالی (شکل های ۲۰ و ۲۱)، مدل سازی در تکرار یازدهم همگرا می شود. ولی همان گونه که می بینید مدل نهایی حاصل شده، با مدل واقعی کاملاً متفاوت است (شکل ۱۹-د). در این حالت نتایج تکرار اول (شکل ۱۹-ج) کمی به مدل سازی نمی کند.



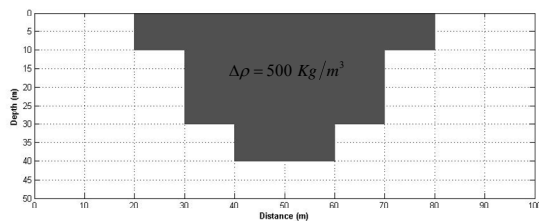
شکل ۱۴. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.



شکل ۱۳. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.



(الف)



(ب)

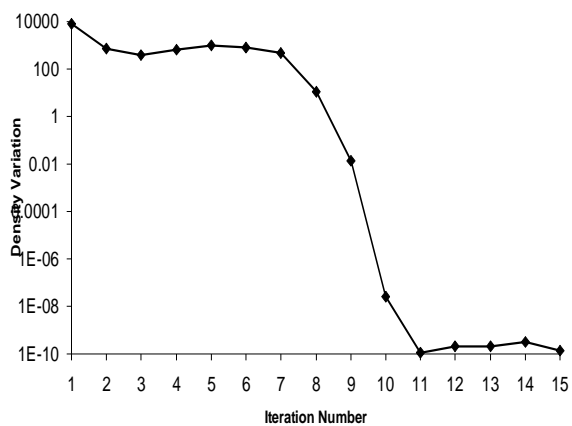
-103.4	-121.4	400.5	515.4	580.1	580.1	515.4	400.5	-121.4	-103.4
13.91	84.63	246.5	364.7	417.6	417.6	364.7	246.5	84.63	13.91
67.64	122.2	201.8	271.3	308.3	308.3	271.3	201.8	122.2	67.64
87.77	126.1	172.5	213.3	236.4	236.4	213.3	172.5	126.1	87.77

(ج)

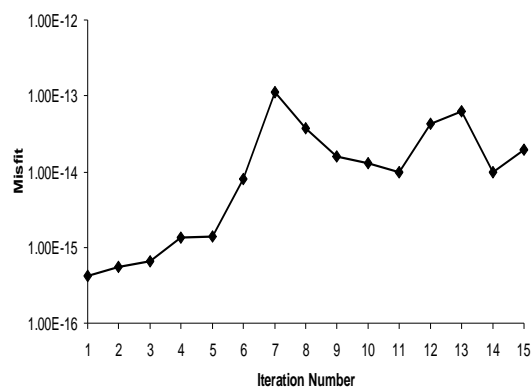
18.5	0	409.5	179.8	0	0	179.8	409.5	0	18.5
0	0	0	1389	1882	1882	1389	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(د)

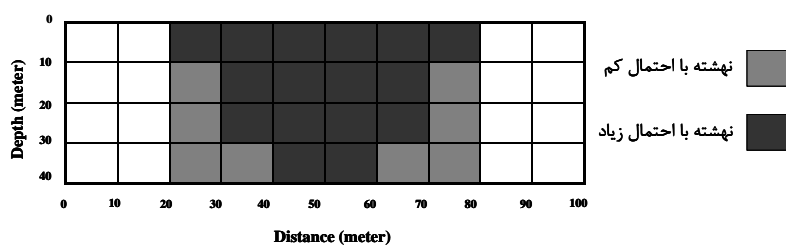
شکل ۱۵. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهشته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱ و (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱۱.



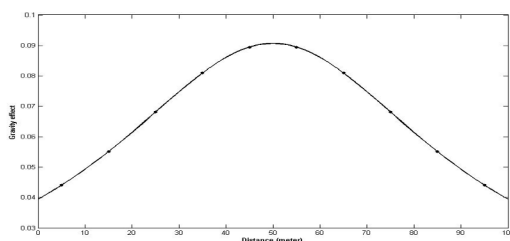
شکل ۱۷. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.



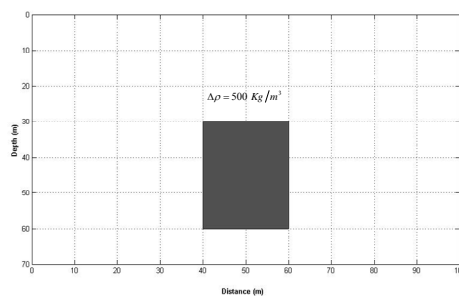
شکل ۱۶. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.



شکل ۱۸. مدل تقریبی نهیسته.



(الف)



(ب)

28.15	29.79	47.66	72.02	91.22	91.22	72.02	47.66	29.79	28.15
24.59	33.25	44.63	57.44	66.26	66.26	57.44	44.63	33.25	24.59
24.47	31.66	39.50	46.90	51.56	51.56	46.90	39.50	31.66	24.47
23.77	29.15	34.56	39.17	41.89	41.89	39.17	34.56	29.15	23.77
22.58	26.56	30.34	33.38	35.09	35.09	33.38	30.34	26.56	22.58
21.19	24.16	26.85	28.94	30.08	30.08	28.94	26.85	24.16	21.19
19.77	22.01	23.98	25.46	26.26	26.26	25.46	23.98	22.01	19.77

(ج)

129.9	137.8	174.5	213.8	241.8	241.8	213.8	174.5	137.8	129.9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

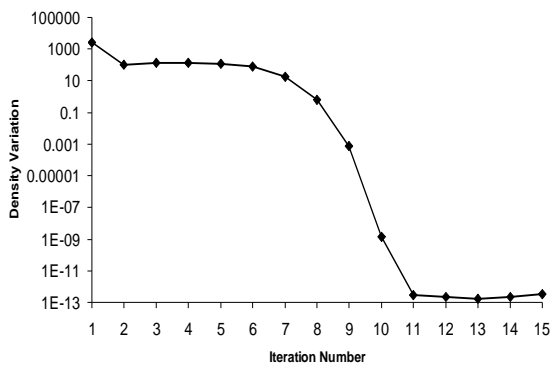
(د)

شکل ۱۹. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) بی‌هتجاری گرانی مشاهده شده، (ب) ساختار نهیسته، (ج) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱ و (د) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱۱.

مدل‌سازی در نظر گرفته شده که نمودار آن در شکل (۲۶-الف) آورده شده است.

در این ناحیه، نتایج تجزیه و تحلیل نمونه‌های برداشت شده، حاکی از اختلاف چگالی حدود 1350 kg/m^3 بین نهشته موردنظر و سنگ‌های ناحیه است. با به‌کارگیری این روش مدل‌سازی روی مقطع AB ، عمق و محدوده تقریبی نهشته به‌دست آمده که در شکل (۲۶-ب) نشان داده شده است. در اینجا طول و عرض بلوک‌ها بعد از آزمایش حالات گوناگون، $5 \times 2/5$ در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل می‌بینیم، هدف موردنظر از عمق حداقل ۱۰ متر شروع می‌شود و به عمق بیشینه ۳۵ متر می‌رسد. مقدار بی‌هنجاری حاصل از مدل به‌دست آمده، خیلی نزدیک به مقدار واقعی بی‌هنجاری گرانی ما در مقطع AB است (شکل ۲۶-الف).

نکته‌ای را که باید به آن اشاره کرد این است که واقعاً هیچ روشی وجود ندارد تا شکل دقیقی از نهشته به‌دست دهد و همه روش‌های معکوس‌سازی، شکلی تقریبی از نهشته را نشان می‌دهند که حتی ممکن است با شکل واقعی هدف موردنظر، بسیار متفاوت باشد؛ و این یکی از مشکلات اساسی داده‌های پتانسیل است. حداقل به کمک این روش‌های مدل‌سازی می‌توان برآوردی از محدوده عمقی و مرزی نهشته به‌دست آورد.

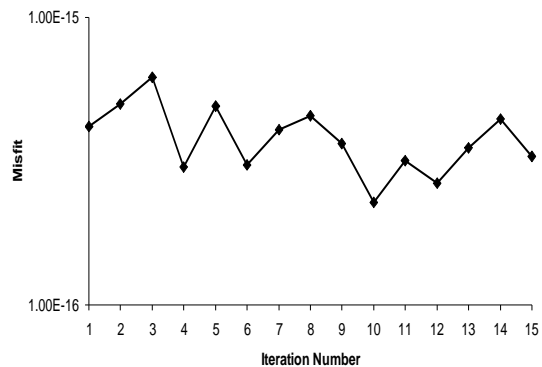


شکل ۲۱. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.

در صورتی که یک دید اولیه از محدوده عمقی نهشته وجود داشته باشد، این مشکل حل می‌شود. بنابراین در این مثال با فرض اینکه نهشته در محدوده ۶۰-۳۰ متر است، مدل‌سازی پیاده می‌شود (شکل ۲۲). با توجه به معیارهای توقف تابع عدم برازش و تغییر چگالی (شکل ۲۳ و ۲۴)، مدل‌سازی در تکرار پنجم همگرا می‌شود. در شکل (۲۲-الف و ۲۲-ب)، نتایج تکرارهای اول و پنجم نشان از همگرایی درست به مدل واقعی است. نتایج در همه مثال‌های ذکر شده، حکایت از برتری معیار توقف تغییر چگالی بر تابع عدم برازش دارد.

۶ مدل‌سازی داده‌های واقعی

ناحیه موردنظر در غرب ایران و در زون زمین‌ساختی زاگرس واقع شده است. در منطقه دهلران، هدف ما اکتشاف بیتومین‌های نفتی است. از نظر زمین‌شناسی سنگ‌های منطقه آهکی O ماری است. برای برداشت نقاط از دستگاه گرانی‌سنجی نوع Scintrex CGS با دقت ۵ میکروگال استفاده شده است. شبکه ۲۰ در ۲۰ متر برای برداشت این ناحیه را گروه گرانی‌سنجی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برقرار کرده‌اند. بعد از تصحیح داده‌های برداشت شده و حذف اثر روند ناحیه‌ای (درجه ۲)، بی‌هنجاری موردنظر ترسیم شد (شکل ۲۵). در این بی‌هنجاری، نیم‌رخ شمال غربی - جنوب شرقی AB برای



شکل ۲۰. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.

Depth (meter)	30	-41.03	10.15	-48.80	29.66	610.8	610.8	29.66	-48.80	10.15	-41.03	
40	3.382	20.83	46.58	139.1	289.2	289.2	139.1	46.58	20.83	3.382		
50	24.85	41.84	72.69	123.9	174.2	174.2	123.9	72.69	41.84	24.85		
60												
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Distance (meter)

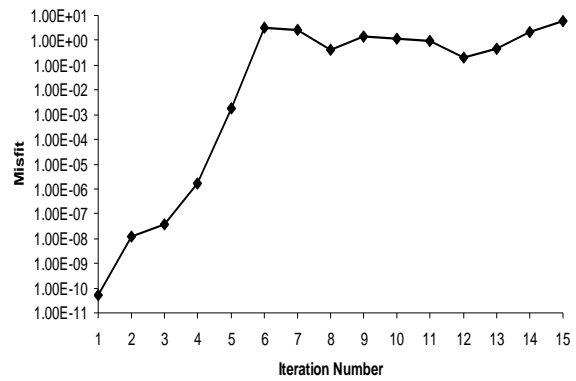
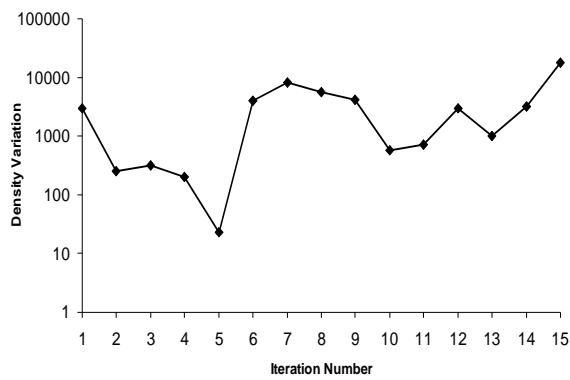
(الف)

Depth (meter)	30	0	0	0	0	500	500	0	0	0	0	
40	0	0	0	0	0	500	500	0	0	0	0	
50	0	0	0	0	0	500	500	0	0	0	0	
60												
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Distance (meter)

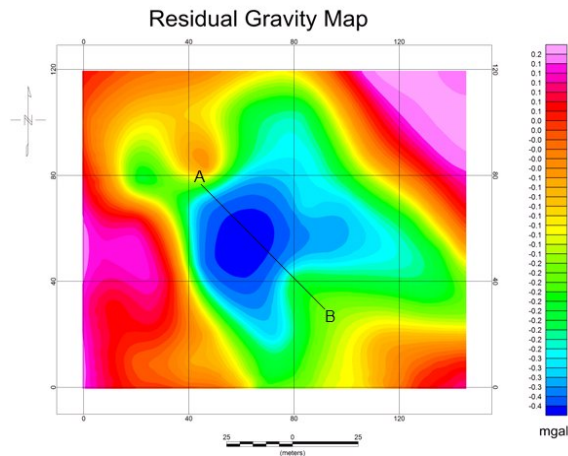
(ب)

شکل ۲۲. نتایج مدل‌سازی معکوس فشرده: (الف) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۱ و (ب) نتایج مدل‌سازی در تکرار ۵.

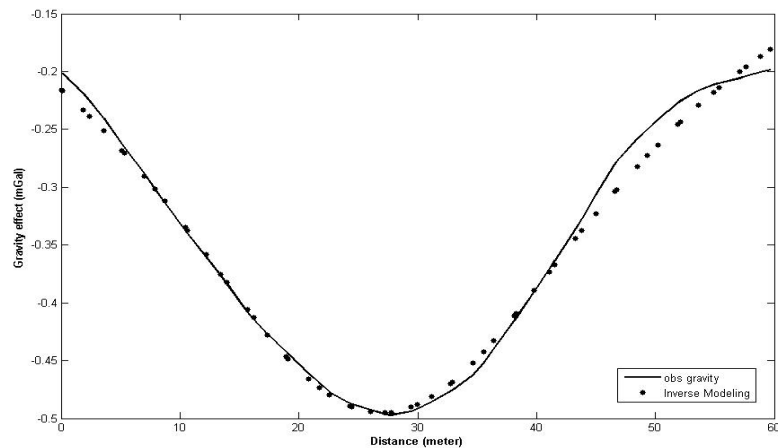


شکل ۲۳. مقدار تابع عدم برازش برای تکرارهای متفاوت.

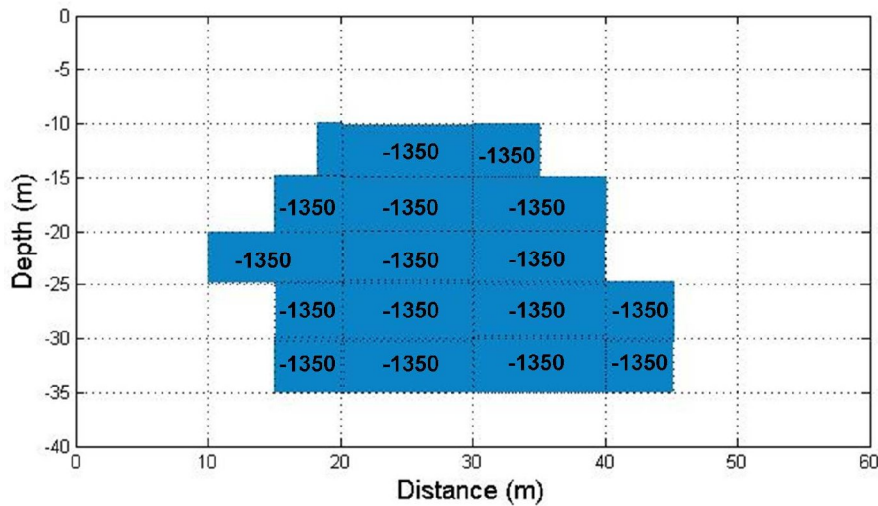
شکل ۲۴. مقدار تابع تغییر چگالی برای تکرارهای متفاوت.



شکل ۲۵. نقشه بی‌هنجاری بازماند منطقه.



(الف)



(ب)

شکل ۲۶. مدل‌سازی داده‌های واقعی: (الف) بی‌هنجاری ناشی از مقطع AB و بی‌هنجاری ناشی از مدل‌سازی صورت‌گرفته و (ب) مدل نهشته به‌دست آمده به کمک روش معکوس‌سازی فشرده.

۷ نتیجه‌گیری

رسید که در صورت حفاری در منطقه مورد‌نظر، در عمقی کمتر از ۱۰ متر به نهشته مورد‌نظر برخورد می‌شود و در صورت ادامه حفاری تا عمق تقریبی ۳۵ متر لایه زغال وجود دارد. نتایج حفاری حاکی از این است که کمترین عمق لایه زغال بین ۷ تا ۱۰ متر است. این روش قابلیت زیادی برای به‌کارگیری سایر داده‌های پتانسیل، مانند میکروگرانی‌سنجی و مغناطیسی را دارد و فقط تفاوت آن با داده‌های مغناطیسی این است که ضریب خودپذیری مغناطیسی به‌جای چگالی برآورد می‌شود.

به‌دلیل ضرورت به‌کارگیری روش مدل‌سازی برای شکل‌های نامشخص هندسی، از روش معکوس‌سازی فشرده استفاده می‌شود. روش استفاده شده مدل بهبودیافته این روش است که از تابع تغییر چگالی برای رسیدن به بهترین جواب ممکن استفاده می‌کند. این روش پس از آزمودن مدل‌های مصنوعی روی داده‌های واقعی، یعنی نهشته زغال بیتومینه دهلران ایران، اجرا شد. طبق نتایج تقریبی این مدل‌سازی صورت گرفته، می‌توان به این نتیجه

تشکر و قدردانی

از موسسه ژئوفیزیک و دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران برای در اختیار قرار دادن داده‌ها، کمال تشکر را داریم.

منابع

نجاتی کلاته، ع.، و ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۴، مدل‌سازی وارون دو بُعدی داده‌های گرانی. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۱، (۱)، ۲۷-۳۷.

نجاتی کلاته، ع.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، زمردیان، ح.، و شاهین، ا.، ۱۳۸۴، مدل‌سازی سه بُعدی داده‌های

گرانی با استفاده از روش وارون‌سازی فشرده. مجله

علوم زمین، ۵۵، ۱۸-۲۹.

Ekinci, Y. L., 2008, 2D focusing inversion of gravity data with the use of parameter variation as a stopping criterion: Journal of the Balkan Geophysical Society, **11**, (1), 1-9.

Last, B. J. J., and Kubik, K., 1983, Compact gravity inversion: Geophysics. Soc. of Expl. Geophys, **48**, 713-721.

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.

Stocco, S., Godio, A., and Sambuelli, L., 2009, Modelling and compact inversion of magnetic data: A Matlab code. Computers & Geosciences. **35**, 2111-2118.